



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima, Colombia

César Leonardo Ardila Pinilla

clardilap@unal.edu.co / cesarardila@solcing.com

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes
Proyecto Arquitectónico y de Producto
Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia
2013

Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima, Colombia

César Leonardo Ardila Pinilla

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Construcción

Director:
M.Sc. Jorge Enrique Lozano Peña

Línea de Investigación:
Materiales para Construcción

Grupo de Investigación:
Madera y Guadua

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes
Proyecto Arquitectónico y de Producto
Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia

2013

Agradecimientos

Detrás de este trabajo existe el apoyo y sacrificio de varias personas, así como la colaboración de algunas entidades sin las cuales hubiese sido imposible la consecución a buen término de la presente investigación, a ellos expreso mi más sincera gratitud, especialmente:

A mi profesor, el arquitecto Jorge Enrique Lozano Peña, a quien tuve la buena fortuna de conocer y contar con él como director de Tesis, el cual me apoyó e instó a seguir siempre adelante, aportando todo su conocimiento y experiencia, a él muchas gracias.

A la profesora Caori Takeuchi Tam, por sus observaciones y correcciones, las cuales mejoraron la calidad técnica y científica del presente documento. A la ingeniera Patricia Luna, por sus importantes recomendaciones en la ejecución y análisis de los ensayos. A la arquitecta Diana Ovalle, por su acompañamiento e instrucción en el laboratorio. Y a todos quienes hacen parte del grupo de investigación de Madera y Guadua de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, muchas gracias.

A mi compañero y amigo el ingeniero Ramón Santiago Cervera, por su paciencia y colaboración; propietario de la finca “El Paraíso” en el municipio de Venadillo Tolima, de donde se extrajo parte del material utilizado en este proyecto.

A mi esposa Martha Eugenia, y mis hijos Lorena y Sebastián, de quienes tomé tiempo valioso de atención y cuidado difícil de reponer.

Resumen

Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima, Colombia

En el año 2010 Colombia aprueba el uso la *Guadua angustifolia* Kunth como material estructural a través del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Título G. Contribuyendo con esta iniciativa del gobierno nacional, diferentes grupos de investigación en el país se han dado a la labor de reunir información alrededor de las características físicas y mecánicas de este material, con el fin de ir actualizando el reglamento y hacer más especializado y confiable su empleo en la construcción de edificaciones. En este sentido, el presente trabajo determina los valores de los esfuerzos admisibles para la *Guadua angustifolia* del departamento de Tolima, trabajo que es complementario al del proyecto denominado “Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles” que cubre los departamentos de Quindío, Cundinamarca y Valle del Cauca. Estos proyectos fueron auspiciados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Rural de Colombia, y desarrollados por el grupo de investigación "Madera y Guadua" de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

Palabras clave: Bambú *Guadua angustifolia* Kunth, esfuerzos admisibles.

Abstract

Experimental determination of allowable stresses for bamboo *Guadua angustifolia* Kunth from the department of Tolima, Colombia

In 2010 Colombia approved the use *Guadua angustifolia* Kunth as structural material based the Colombian Seismic Building Codes NSR -10 Title G. Contributing to this initiative of the national government, different research groups in the country have been given the task of gathering information about the physical and mechanical properties of this material, order to update the code and make more specialized and reliable employment in construction of buildings. In this sense, this investigation determines the values of allowable stresses to the *Guadua angustifolia* from Tolima department, present work is complementary to the project "Design methodology for structures that use *guadua angustifolia* as structural material by allowable stresses" covering the departments from Quindío, Valle del Cauca and Cundinamarca. These projects has been financed by the Ministry of Agriculture and Rural Development of Colombia and carried out by the Universidad Nacional de Colombia.

Keywords: Bamboo *Guadua angustifolia* Kunth, allowable stresses.

Contenido

	Página
Resumen.....	IV
Abstract.....	V
Lista de Figuras.....	VIII
Lista de Tablas.....	XI
Introducción.....	1
1. Objetivos.....	5
1.1 Objetivo general.....	5
1.2 Objetivos específicos.....	5
2. Antecedentes.....	6
3. Preliminares.....	9
3.1 Aprovechamiento , rotulado y trozado en culmos.....	9
3.2 Despacho, recepción y almacenamiento.....	13
3.3 Obtención de probetas.....	15
4. Introducción a la determinación de los valores de esfuerzos admisibles.....	18
5. Ensayo de contenido de humedad (CH).....	22
5.1 Resultados y análisis de datos (CH).....	26
6. Ensayo de corte paralelo a la fibra (V).....	28
6.1 Resultados y análisis de datos (V).....	32
7. Ensayo de compresión paralela a la fibra (C).....	37
7.1 Resultados y análisis de datos (C).....	43
8. Ensayo de tracción paralela a la fibra (T)	52
8.1 Resultados y análisis de datos (T).....	58
9. Ensayo de flexión (F).....	66
9.1 Resultados y análisis de datos (F).....	69
10. Ensayo de compresión perpendicular a la fibra (Cp).....	73
10.1 Resultados y análisis de datos (Cp).....	77

11.	Conclusiones.....	81
12.	Recomendaciones y comentarios finales.....	83
	Bibliografía.....	85
	Anexo 1: Tablas y gráficas comparativas con valores de otros proyectos.....	87

Lista de Figuras

		Página
Figura 3.1	Rodal silvestre de bambú <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	9
Figura 3.2	Sección de las guaduas óptimas para el aprovechamiento.....	10
Figura 3.3	Marcación de guaduas seleccionadas para el aprovechamiento.....	11
Figura 3.4	Nomenclatura usada para identificar los culmos de guadua.....	11
Figura 3.5	Trozado y rotulado de los culmos de las guaduas cortadas.....	12
Figura 3.6	Despacho del material desde el corregimiento de Junín hasta la ciudad de Bogotá.....	13
Figura 3.7	Numeración y marcación del material.....	14
Figura 3.8	Medición de longitud del entrenudo, y espesor de la pared del culmo...	14
Figura 3.9	Nomenclatura para identificar las probetas de los ensayos.....	15
Figura 3.10	Formato para caracterizar culmos y esquema de corte de probetas.....	16
Figura 3.11	Probetas dispuestas para cada ensayo en particular.....	17
Figura 3.12	Inmersión de probetas en agua.....	17
Figura 4.1	Distribución de probetas para los diferentes tipos de ensayo.....	18
Figura 4.2	Factores de reducción NSR-10.....	21
Figura 5.1	Equilibrio de Contenido de Humedad NSR-10.....	23
Figura 5.2	Coeficientes de modificación por contenido de humedad NSR-10.....	24
Figura 5.3	Esfuerzos admisibles NSR-10.....	24
Figura 5.4	Elaboración pesado y secado de las diferentes probetas para ensayo.	25
Figura 6.1	Ensayo de corte paralelo a la fibra.....	29

Figura 6.2	Curva carga vs desplazamiento en el ensayo de corte paralelo.....	30
Figura 6.3	Falla típica en el ensayo de corte paralelo a la fibra (V).....	30
Figura 6.4	Resistencia última corte paralelo a la fibra vs Contenido de Humedad.	35
Figura 7.1	Instrumentación con deformímetro eléctrico en probetas de compresión paralela.....	37
Figura 7.2	Curva carga vs desplazamiento en el ensayo de compresión paralela a la fibra	39
Figura 7.3	Falla típica en el ensayo de compresión paralela.....	39
Figura 7.4	Diagrama esfuerzo vs deformación longitudinal, ensayo a compresión paralela a la fibra para determinar el módulo de elasticidad.....	40
Figura 7.5	Diagrama esfuerzo vs deformación longitudinal y transversal de probetas ensayadas a compresión paralela a la fibra para determinar el coeficiente de Poisson.....	41
Figura 7.6	Resistencia última del ensayo a compresión paralela a la fibra vs Contenido de Humedad de las probetas no-instrumentadas.....	49
Figura 7.7	Resistencia última del ensayo a compresión paralela a la fibra vs Contenido de Humedad de probetas instrumentadas.....	50
Figura 7.8	Resistencia última del ensayo a compresión paralela a la fibra vs Contenido de Humedad de probetas instrumentadas y no-instrumentadas con deformímetro eléctrico.....	51
Figura 8.1.	Falla típica en el ensayo de tracción paralela a la fibra.....	53
Figura 8.2	Curva carga vs desplazamiento, ensayo de tracción paralela a la fibra.	54
Figura 8.3	Probetas de tracción paralela a la fibra (T) instrumentadas con deformímetro eléctrico para determinar el módulo de elasticidad longitudinal (E_T).....	55
Figura 8.4	Diagrama esfuerzo vs deformación longitudinal del ensayo a tracción paralela a la fibra (T) para determinar el módulo de elasticidad.....	56
Figura 8.5.	Resistencia última del ensayo a tracción paralela a la fibra vs Contenido de humedad de probetas no-instrumentadas.....	64
Figura 8.6	Resistencia última del ensayo a tracción paralela a la fibra vs Contenido de humedad de probetas instrumentadas.....	65

Figura 9.1	Montaje probetas culmos medios en el ensayo de flexión (F) para determinar el esfuerzo último y módulo de elasticidad.....	66
Figura 9.2	Falla típica en el ensayo a flexión	67
Figura 9.3	Carga vs deflexión en el ensayo de flexión.....	67
Figura 9.4	Resistencia última del ensayo a flexión vs Contenido de humedad.....	72
Figura 10.1	Esquema del ensayo a compresión perpendicular a la fibra (Cp).....	74
Figura 10.2	Curva carga vs desplazamiento en el ensayo a compresión perpendicular a la fibra (Cp).....	74
Figura 10.3	Falla típica en el ensayo de compresión perpendicular a la fibra.....	75
Figura 10.4	Resistencia última del ensayo a compresión perpendicular a la fibra (Cp) vs Contenido de humedad (CH).....	80
Figura anexo 1.1	Comparativo de los valores determinados de esfuerzos admisibles del presente trabajo con los del Proyecto MADRC y el Reglamento NSR-10, por diagrama de barras.....	88
Figura anexo 1.2	Comparativo de los valores determinados del módulo de elasticidad longitudinal para el ensayo a compresión paralela a la fibra del presente trabajo con los del Proyecto MADRC.....	90
Figura anexo 1.3	Comparativo de los valores determinados del módulo de elasticidad longitudinal para el ensayo a tracción paralela a la fibra del presente trabajo con los del Proyecto MADRC.....	91
Figura anexo 1.4	Comparativo de los valores determinados del módulo de elasticidad longitudinal para el ensayo a flexión del presente trabajo con los del Proyecto MADRC y el Reglamento NSR-10...	92

Lista de Tablas

	Página
Tabla 5.1 Análisis estadístico para el contenido de humedad (CH).....	26
Tabla 6.1 Distribución de probetas ensayadas para determinar la resistencia última al corte paralelo a la fibra.....	28
Tabla 6.2 Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a corte paralelo a la fibra	31
Tabla 6.3 Análisis estadístico del esfuerzo último a corte paralelo a la fibra.....	32
Tabla 6.4 Determinación del esfuerzo admisible a corte paralelo a la fibra.....	33
Tabla 6.5 Resultados obtenidos del esfuerzo admisible a corte paralelo a la fibra para diferentes departamentos de Colombia.....	34
Tabla 6.6 Análisis estadístico para el contenido de humedad para las probetas ensayadas a corte paralelo a la fibra (V).....	34
Tabla 7.1 Distribución de las probetas ensayadas a compresión paralela a la fibra para determinar el esfuerzo último.....	37
Tabla 7.2 Distribución de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico para determinar el módulo de elasticidad longitudinal a compresión paralela a la fibra	38
Tabla 7.3 Distribución de las probetas instrumentadas para determinar el coeficiente de Poisson del ensayo a compresión paralela.....	38
Tabla 7.4 Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a compresión paralela a la fibra de las probetas no-instrumentadas.....	42
Tabla 7.5 Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a compresión paralela a la fibra de las probetas instrumentadas con deformímetro.....	42
Tabla 7.6 Análisis estadístico del esfuerzo último a compresión paralela a la fibra para probetas no-instrumentadas con deformímetro eléctrico.....	43
Tabla 7.7 Análisis estadístico del esfuerzo último a compresión paralela a la fibra para probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.....	44

Tabla 7.8	Determinación del esfuerzo admisible a compresión paralela a la fibra por la ecuación 7.3.....	46
Tabla 7.9	Resultados obtenidos del esfuerzo admisible a compresión paralela a la fibra para diferentes departamentos de Colombia determinados a través de la ecuación 7.3.....	46
Tabla 7.10	Análisis estadístico para el módulo de elasticidad longitudinal a compresión paralela a la fibra.....	47
Tabla 7.11	Análisis estadístico para determinar el coeficiente de Poisson a compresión paralela a la fibra.....	48
Tabla 7.12	Análisis estadístico del contenido de humedad para probetas instrumentadas y no-instrumentadas ensayadas a compresión paralela.	49
Tabla 8.1	Distribución de las probetas ensayadas a tracción paralela a la fibra para determinar el esfuerzo último.....	52
Tabla 8.2	Distribución de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico para determinar el módulo de elasticidad longitudinal a tracción paralela	54
Tabla 8.3	Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a tracción paralela a la fibra de las probetas no-instrumentadas.....	57
Tabla 8.4	Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a tracción paralela a la fibra de las probetas instrumentadas.....	57
Tabla 8.5	Análisis estadístico del esfuerzo último a tracción paralela a la fibra de las probetas no-instrumentadas con deformímetro eléctrico.....	58
Tabla 8.6	Análisis estadístico del esfuerzo último a tracción paralela a la fibra de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.....	59
Tabla 8.7	Determinación del esfuerzo admisible a tracción paralela a la fibra para probetas instrumentadas y no-instrumentadas, por la ecuación 8.2.....	61
Tabla 8.8	Resultados obtenidos del esfuerzo admisible a tracción paralela a la fibra para diferentes departamentos de Colombia con la ecuación 8.2....	61
Tabla 8.9	Análisis estadístico para el módulo de elasticidad a tracción paralela.....	62
Tabla 8.10	Análisis estadístico para el contenido de humedad para las probetas ensayadas a tracción paralela a la fibra.....	63
Tabla 9.1	Distribución de las probetas ensayadas a flexión para determinar la resistencia última y módulo de elasticidad longitudinal.....	66
Tabla 9.2	Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a flexión.....	68

Tabla 9.3	Análisis estadístico del esfuerzo último a flexión.....	69
Tabla 9.4	Determinación del esfuerzo admisible a flexión con ecuación 9.4.....	70
Tabla 9.5	Resultados obtenidos del esfuerzo admisible de flexión para los diferentes departamentos de Colombia, con la ecuación 9.4.....	70
Tabla 9.6	Análisis estadístico para el módulo de elasticidad longitudinal a flexión..	71
Tabla 9.7	Análisis estadístico para el contenido de humedad para las probetas ensayadas a flexión	72
Tabla 10.1	Distribución de las probetas ensayadas a compresión perpendicular a la fibra para determinar el esfuerzo último.....	73
Tabla 10.2	Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a compresión perpendicular a la fibra (Cp).....	76
Tabla 10.3	Análisis estadístico del esfuerzo último a compresión perpendicular.....	77
Tabla 10.4	Determinación del esfuerzo admisible a compresión perpendicular a la fibra por la ecuación 10.2.....	78
Tabla 10.5	Resultados obtenidos del esfuerzo admisible a compresión perpendicular (Cp) para los diferentes departamentos de Colombia, determinados a través de la ecuación 10.2.....	78
Tabla 10.6	Análisis estadístico para el contenido de humedad para las probetas ensayadas a compresión perpendicular a la fibra.....	79
Tabla anexo 1.1	Comparativo de los valores determinados para los esfuerzos admisibles del departamento de Tolima frente a los del Proyecto MADRC y la NSR-10.....	87
Tabla anexo 1.2	Comparativo de los valores determinados para el módulo de elasticidad longitudinal de la guadua del departamento de Tolima frente a los del Proyecto MADRC y el Reglamento NSR-10.....	89
Tabla anexo 1.3	Comparativo de los valores determinados para el coeficiente de Poisson de la guadua del departamento de Tolima frente a los del Proyecto MADRC.....	93

Introducción

La construcción es una de las industrias que genera más contaminación a nivel mundial, debido entre otras razones a la explotación de canteras de extracción de materias primas para la elaboración típica de materiales usados en la confección de edificaciones. A pesar de lo evidente de esta situación catastrófica la construcción no se puede ni debe detener, ya que es motor e índice de desarrollo y crecimiento de una nación; sin embargo, sí se puede y debe disminuir el impacto ambiental de ésta a través de la implementación paulatina de la construcción sostenible con materiales no convencionales como el bambú *Guadua angustifolia* Kunth. El bambú *Guadua angustifolia* Kunth es una planta que pertenece a la especie vegetal de la familia de las gramíneas, perenne y prolífera en gran parte del territorio nacional, particularmente en la zona andina, donde presenta sus mejor desarrollo vegetativo y silvicultural. En Colombia esta especie se encuentra principalmente en la cordillera central, exactamente en las zonas de ladera y en las riberas de los ríos y quebradas, el rango óptimo de temperatura para su crecimiento varía entre los 20°C y los 26°C. Los suelos que más favorecen su desarrollo son los suelos fértiles, aluviales, derivados de cenizas volcánicas, ricos en materias orgánicas e irrigadas por fuentes naturales de agua¹. Por este motivo la guadua fue usada por nuestros antepasados para la construcción de sus viviendas, ya que presentaba características físicas y mecánicas apropiadas para dicho fin. Hoy por hoy se ha revalidado este conocimiento, y gracias a la investigación se sabe que cumple como material para ser usado en la construcción de edificaciones; Colombia dio un paso importante en términos legislativos y técnicos, al incorporar la guadua por primera vez como material estructural de construcción sismo resistente².

¹ OSORIO, Lina; TRUJILLO DE LOS RIOS, Efraín. Caracterización Físico Química de la fibra de *Guadua angustifolia* Kunth. Universidad Nacional de Colombia. Colombia: Manizales, 2004. ² ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA, AIS. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Titulo G- Estructuras de madera y estructuras de guadua. Marzo de 2010.

Así las cosas, este documento abordará inicialmente los preliminares en el Capítulo 3; donde se describirá cómo se realizó este trabajo desde el aprovechamiento del material pasando por el rotulado, trozado en culmos, despacho y recepción al sitio de disposición final en el laboratorio del grupo de investigación de Guadua y Madera en la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, terminando con la obtención de probetas, esto para que el lector conozca y se familiarice con los procedimientos y herramientas usadas en esta parte de la investigación. Posteriormente, y antes de entrar de lleno en los ensayos de laboratorio, en el Capítulo 4 se describirán, entre otras cosas, la metodología de trabajo, ecuaciones usadas para la determinación de todos los valores de esfuerzos admisibles, módulo de elasticidad de los ensayos a compresión paralela, tracción paralela y flexión, así como el coeficiente de Poisson del ensayo a compresión paralela.

En el Capítulo 5, basados en los parámetros establecidos en la NTC5525 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth”, se hará la descripción del desarrollo y ejecución del ensayo de contenido de humedad (CH); de las muestras con sus respectivos resultados y análisis estadístico de datos, que aunque es un ensayo secundario, es decir, un ensayo que se realiza después de los ensayos mecánicos, es fundamental en este trabajo ya que plantea la inquietud para futuras investigaciones sobre la tendencia y comportamiento del material según el contenido de humedad que se encuentre al interior de su estructura al momento de determinada sollicitación mecánica.

En el Capítulo 6 se describirá el ensayo a corte paralelo a la fibra (V), en donde se realizará un análisis estadístico de datos y contrastarán los resultados con los de otras investigaciones similares, así mismo, se determinarán los esfuerzos admisibles para este tipo sollicitación mecánica aplicando las ecuaciones del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y las descritas en la Norma Técnica Colombiana NTC5525, los cuales se compararán con los valores relacionados en el Reglamento NSR-10 y los determinados en el proyecto de investigación desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia en 2010 denominado “Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles” auspiciado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia; proyecto que se le nombrará a partir de ahora como Proyecto MADRC.

El Capítulo 7 corresponde al ensayo de compresión paralela a la fibra (C); que aunque es un ensayo relativamente simple de ejecutar, trae consigo el aporte de información valiosa, como la misma determinación del valor del esfuerzo admisible, el valor del módulo de elasticidad y el valor del coeficiente de Poisson, por lo que se incorpora para dicho fin la instrumentación de las probetas con deformímetros eléctricos unidireccionales y los multidireccionales o tipo roseta. Así mismo, como en el Capítulo anterior, en este se realizará el análisis estadístico de datos y contrastarán los resultados con los de otras investigaciones similares, igual se determinarán los esfuerzos admisibles aplicando las ecuaciones de la NSR-10 y las de la NTC5525.

En el Capítulo 8 se describirá el ensayo a tracción paralela a la fibra (T), donde se realizará un análisis estadístico de datos y compararán los resultados con los de otras investigaciones similares, así mismo, se determinarán los esfuerzos admisibles para este tipo sollicitación mecánica aplicando las ecuaciones de la NSR-10 y las descritas en la NTC5525, por otro lado se determinará el valor de módulo de elasticidad longitudinal, por lo que se incorpora la instrumentación de las probetas con deformímetros eléctricos unidireccionales.

El Capítulo 9 habla sobre el ensayo a flexión (F); es necesario recalcar que este ensayo es a flexión pura, por lo que cuenta con cuatro apoyos y que la distancia entre ellos es equidistante a los tercios como lo señala la NTC5525. En este ensayo básicamente se determinarán los valores de esfuerzos admisibles y el módulo de elasticidad longitudinal, importante este último, ya que de allí el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 toma los valores de módulo promedio ($E_{0.5}$), módulo percentil 5 ($E_{0.05}$) y del módulo mínimo (E_{\min}) como base para los cálculos en el diseño de estructuras en guadua.

En el Capítulo 10 se describirá y analizará el ensayo a compresión perpendicular (C_p) a la fibra. Se debe recordar que el método para el ensayo en este tipo de sollicitación mecánica no está descrito en la Norma Técnica Colombiana NTC5525 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth” como si lo están los otros ensayos; pero considerando que en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Título G, Tabla G.12.7-1 sí se tiene en cuenta como valor de esfuerzo admisible y carga última para el diseño a través

de la ecuación G.12.8-11, en esta investigación el ensayo de la referencia se desarrolló de acuerdo con los parámetros del Proyecto MADRC “Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles”, esto teniendo en cuenta que el Proyecto MADRC hace parte integral y complementaria del presente trabajo.

Es pertinente recalcar que se tomaron, capítulo por capítulo, los datos de la resistencia última de cada ensayo y se compararon frente a su respectivo contenido de humedad (CH), a través de una gráfica de dispersión de puntos para analizar su tendencia y determinar si el CH tiene incidencia directa en el comportamiento del material ante determinado esfuerzo. Así mismo se podrán observar, a lo largo del desarrollo de cada ensayo, los tipos de falla típica según la sollicitación mecánica a través de imágenes que se obtuvieron en el laboratorio, así como el análisis de las gráficas carga vs desplazamiento.

Finalmente, en el Capítulo 11 se dan las conclusiones y recomendaciones, donde se destacan los resultados obtenidos y elementos más relevantes e importantes de una investigación, que como proyecto individual invirtió más de dos años en tiempo, sin contar costos de compra de material y transporte, honorarios de personal científico y consultores expertos en el tema, horas de uso de maquinaria y equipo de laboratorio, asumidos en gran parte por la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá a través del equipo de trabajo del grupo de investigación de "Madera y Guadua". Por ello se espera que este trabajo sirva como elemento de consulta permanente para trabajos de investigación de la misma naturaleza, y motive a la revisión del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en torno a este tema específico, para que se cuente con una base de datos para el diseño de estructuras de guadua actualizada, especializada y confiable.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar los esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima.

1.2 Objetivos específicos

- Obtener y transportar los culmos de *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima hasta la ciudad de Bogotá.
- Confeccionar las probetas para los ensayos mecánicos a corte, compresión y tracción paralela a las fibras de la guadua, flexión, y compresión perpendicular a la fibra de la guadua.
- Ejecutar los ensayos mecánicos a corte, compresión y tracción paralela a las fibras de la guadua, compresión perpendicular a la fibra de la guadua, y flexión.
- Determinar y analizar estadísticamente el valor del esfuerzo admisible para el ensayo a corte paralelo (F_V), compresión paralela (F_C), tracción paralela a la fibra (F_T), compresión perpendicular a la fibra (F_{Cp}), y flexión (F_F).
- Determinar y analizar estadísticamente el contenido de humedad (CH) de todas las muestras ensayadas.
- Analizar la tendencia existente entre el contenido de humedad (CH) de las probetas al momento de cada ensayo y la resistencia última del material para cada una de las sollicitaciones mecánicas en particular.

2. Antecedentes

En cuanto a la legislación y reglamentación colombiana se refiere, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) ha sido el principal órgano de consulta para la primera incorporación del bambú *Guadua angustifolia* Kunth como material para la construcción a través de la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistentes NSR-98, modificada por el Decreto 52 del 18 de enero de 2002, presentando para su obligatorio cumplimiento del Capítulo E.7 “Casas de uno y dos pisos en bahareque encementado”; el cual contiene los requisitos mínimos necesarios para otorgar a las casas construidas con bahareque encementado de uno y dos pisos un grado de sismo resistencia tal que minimice la posibilidad de que la vivienda colapse durante eventos sísmicos fuertes de baja probabilidad de ocurrencia, que sufra daños estructurales mínimos durante eventos sísmicos moderados, y que no sufra daños estructurales durante eventos sísmicos leves de alta probabilidad de ocurrencia. En el año 2010, la AIS publica el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, en donde presenta el Título G denominado “Estructuras de madera y estructuras de guadua”, el cual dedica el Capítulo G.12 al diseño de elementos estructurales de *Guadua angustifolia* Kunth.

Desde el punto de vista normativo, en el ámbito nacional, a partir del año 2007 existen documentos diferentes al anteriormente descrito, que han sido el soporte metodológico y técnico, otorgando trazabilidad a la mayoría de los trabajos de investigación que se relacionarán en este, incluyendo a la NSR-10. Estos documentos son las Normas Técnicas Colombianas, editadas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, dentro de las que se encuentran: La NTC5525 (2007) “métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth” la cual es una versión modificada para Colombia de la norma ISO22157-1 (2004) “Determination of physical and mechanical properties of bamboo”, cuyo objetivo fundamental es presentar un método apropiado de ensayos para obtener resultados de laboratorio, los cuales se pueden utilizar para establecer valores y resistencias del material de referencia, y establecer la relación de propiedades físicas y contenido de

humedad, densidad, contracción, compresión paralela, flexión, corte paralelo y tracción paralela entre otros, excepto el ensayo de compresión perpendicular a la fibra.

La NTC5301 (2007) “Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth”, cuyo principal objetivo es el de establecer los requisitos que se deben seguir para la preservación y secado de los culmos de *Guadua angustifolia* Kunth de acuerdo con las aplicaciones y usos, estos aplican específicamente para preservar el material de los ataques bióticos y abióticos, y para establecer el contenido de humedad de acuerdo con su uso final. La NTC5300 (2008) “cosecha y postcosecha del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth”, cuyo objetivo es establecer los requisitos que se deben seguir para la cosecha y postcosecha de los culmos maduros de *Guadua angustifolia* Kunth en el territorio nacional.

En relación con la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del bambú *Guadua angustifolia* Kunth como material estructural, para la determinación de los valores de esfuerzos admisibles bajo las diferentes sollicitaciones mecánicas de compresión paralela y perpendicular a la fibra, corte paralelo con nudo y sin nudo, tracción paralela, flexión y contenido de humedad se deben nombrar algunas de las investigaciones y trabajos más relevantes e importantes en este tema tanto en Colombia como en otros países: En el año 2011, Gutiérrez presenta el trabajo de investigación denominado “Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* Kunth” esta investigación se destaca por ser uno de los primeros y más completos trabajos que trata la relación entre el contenido de humedad de la guadua ante un esfuerzo determinado, en este caso, el de tracción, y muestra un factor de corrección que puede ser usado para el diseño de estructuras en guadua.

En julio de 2010, se terminó el trabajo de investigación denominado “Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles” realizada por el grupo de investigación de Madera y Guadua, y el grupo de Análisis, Diseño y Materiales GIES de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, auspiciada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (Proyecto MADRC), en donde se presentan los resultados obtenidos de los valores de los esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth a partir de resultados obtenidos en laboratorio, de tres departamentos del país a saber; Cundinamarca, Quindío y Valle del Cauca.

En el año 2006, Pacheco presentó una investigación donde determina la resistencia a la tracción perpendicular a la fibra de la *Guadua angustifolia* Kunth. En este trabajo se realiza una correlación entre el contenido de humedad y la variación de la resistencia. La investigación muestra la relación entre humedad y resistencia, sin llegar a proponer algún factor de corrección por contenido de humedad. En el año 2005, Osorio, Vélez y Ciro de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, investigaron sobre la estructura interna de la guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas, y publicaron su trabajo denominado “Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la *Guadua angustifolia* Kunth”.

En el año 2004, Castrillón y Malaver trabajaron en los procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la guadua. Allí se describen los pasos que se deben seguir en la realización de los ensayos a tracción paralela a la fibra y contenido de humedad.

Así mismo, desde hace más de una década la Universidad Tecnológica de Pereira UTP, a través de su grupo de investigación, trabaja en las características físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth, en donde sobresalen las investigaciones relacionadas con la metodología de preparación de muestras experimentales para determinar la dureza brinell y la influencia de la humedad relativa del ambiente, de la edad y la altura relativa del tramo, determinación de los valores del ensayo a flexión y comparación del secado solar de la especie de Bambú de la referencia.

Desde el punto de vista internacional, J.J. Janssen y el grupo de investigación en la Universidad Tecnológica de Eindhoven a partir del año 1981, presenta algunos documentos como “Bamboo in a building structures” o “Fundamentals of desing in bamboo structures” los cuales muestran los procedimientos de ensayo y las metodologías de diseño de elementos estructurales con bambú.

Por último en el año 2002, el Profesor Khosrow Ghavami de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro en Brasil, realizó trabajos para determinar las propiedades físicas y mecánicas del Bambú, entre estos la guadua, ante sollicitaciones mecánicas de compresión y tracción paralela a la fibra, corte y esfuerzos de flexión.

3. Preliminares

Este Capítulo describe cómo se realizó el trabajo en campo, empezando por el aprovechamiento del material en el departamento de Tolima, pasando por el rotulado, trozado en culmos, despacho y recepción al sitio de disposición final en el laboratorio de la Universidad Nacional en la ciudad de Bogotá, terminando posteriormente con la obtención de probetas. Esto con el fin de que el lector conozca los procedimientos y herramientas usadas en la primera parte del desarrollo de la investigación. Se recuerda que el presente trabajo hace parte complementario del proyecto de investigación MADRC “Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles”, por lo cual se siguieron para este trabajo las mismas condiciones técnicas y metodológicas durante la preparación de probetas y ensayos, con el fin de realizar una comparación directa entre sus respectivos datos.

3.1 Aprovechamiento, rotulado y trozado en culmos

Los culmos del bambú *Guadua angustifolia* Kunth usados como material de ensayo para esta investigación fueron seleccionados de diferentes rodales en pie ubicados en fincas de cuatro municipios del departamento de Tolima; Junín, Líbano, Palocabildo y Villahermosa. La Figura 3.1 ilustra uno de los rodales y su interior, de donde se seleccionaron y aprovecharon 14 culmos completos de guadua.



Figura 3.1: Rodal silvestre de bambú *Guadua angustifolia* Kunth

La selección de este material fue realizado por personal calificado oriundo del sitio, con experiencia en el aprovechamiento de la guadua, quien pudo identificar la especie y comprender la importancia de un apropiado corte de los culmos; teniendo en cuenta los requerimientos de la NTC5525, para otorgarle desde el inicio al proyecto la trazabilidad requerida teniendo en cuenta el tipo de investigación.

Los culmos seleccionados para esta investigación fueron sanos y libres de todo defecto evidente, representando el promedio de los culmos del rodal al aprovecharlos de forma aleatoria. Antes del aprovechamiento se escogieron los culmos que serían cortados y se hizo una limpieza del sitio, con el fin primero de permitir la extracción del material en el rodal y segundo en beneficio del propietario de la finca quien permitió extraer la guadua. La Figura 3.2 ilustra la selección de parte de las guaduas que se usaron en este proyecto.



Figura 3.2: Selección de las guaduas óptimas para el aprovechamiento, finca “el paraíso” corregimiento de Junín, Tolima.

Antes del corte se marcaron las guaduas a una altura de 0.80 a 1.00 m desde el suelo, otras se podaron desde la base para eliminarlas y poder conservar la distancia de crecimiento adecuada para un futuro corte (ver Figura 3.3), así mismo, se registró en un formato el nombre de la finca, los culmos seleccionados, el aspecto y estado de madurez de los culmos, los detalles en relación con los defectos en los culmos, la fecha de corte, nombre del responsable del corte, todo esto conforme lo indica la NTC5525 y la NTC5300.



Figura 3.3: Marcación de las guaduas seleccionadas para el aprovechamiento.

Con el objetivo de conocer la procedencia exacta de cada una de las probetas usadas en los ensayos mecánicos, que debe incluir el lugar de procedencia del culmo, parte de la guadua (cepa, basa o sobrebasa) y número de entrenudo, se estableció un protocolo de corte de culmos y probetas (ver Figura 3.4):

D	J	01	M
a	b	c	d

En donde:

- a** Departamento de origen (TOLIMA)
- b** Municipio de origen:
 - J** Junín
 - L** Líbano
 - P** Palocabildo
 - V** Villahermosa
- c** Número de la guadua cortada de 1 a 14
- d** Parte o ubicación del culmo en la guadua cortada:
 - I** Inferior
 - M** Media
 - S** Superior

Figura 3.4: Nomenclatura usada para la identificación de los culmos de guadua

En la Figura 3.5b se ilustra además la nomenclatura usada para la identificación de las guaduas usadas en este proyecto, de acuerdo con su departamento y municipio de origen así mismo, el número de culmos y su posición relativa en la guadua.

Como el presente trabajo hace parte consecutiva del Proyecto MADRC, para identificar al departamento de Tolima se le relacionó con la letra “D” ya que las letras “A, B y C” les correspondieron a los departamentos de Quindío, Cundinamarca y Valle del Cauca respectivamente; departamentos que pertenecen al proyecto de la referencia inicial.

En la Figura 3.5 se puede identificar el trozado de las guaduas por culmos y la identificación de los mismos de acuerdo con la nomenclatura usada.



Figura 3.5: a) trozado. b) rotulado de los culmos de las guaduas cortadas.

3.2 Despacho, recepción y almacenamiento

La guadua usada en este proyecto fue despachada a su sitio de disposición final a los pocos días de haber sido cortada, esto con el fin de que no sufriera de agrietamientos prematuros, una pérdida considerable de su contenido de humedad, o sufriese lesiones por el ataque de insectos.

En la Figura 3.6 se puede apreciar el despacho del material que inició con un breve recorrido a lomo de mula hasta llegar a la carretera donde se pudo cargar en vehículo, el cual transportaría los culmos a su destino final en la ciudad de Bogotá, donde se previno y trató de evitar cualquier golpe que ocasionara lesiones en los culmos, que como consecuencia fueran desechados para ensayos de laboratorio, así mismo, los arrumes fueron lo suficientemente bajos como para no producir aplastamiento por su propio peso o que en caso de un bache se pudiera causar un golpe muy fuerte.



Figura 3.6: Despacho del material desde el corregimiento de Junín hasta la ciudad de Bogotá.

Una vez recibido el material al lugar de disposición final en la ciudad de Bogotá, en el Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad Nacional de Colombia, fue organizado, inventariado y numerado, como se puede apreciar en la Figura 3.7.



Figura 3.7: Numeración y marcación del material.

Posteriormente, los culmos fueron medidos y caracterizados como lo indica la NTC5525, (ver Figura 3.8) y toda la información fue consignada en un formato diseñado para tal fin antes de digitalizarlos en formato AutoCAD (ver Figura 3.10).



a)



b)

Figura 3.8: a) medición longitud del entrenudo. b) medición espesor de la pared del culmo.

3.3 Obtención de probetas


Las probetas obtenidas para la realización de los diferentes ensayos mecánicos fueron rotuladas debidamente, conforme se muestra en el formato de la Figura 3.9, en donde se indica el departamento de origen (Tolima), el tipo y número de ensayo según correspondió, así como la posición relativa de la probeta en un culmo.

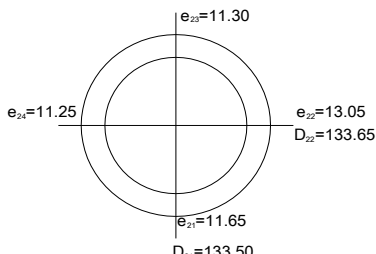
D	Cp	01	M
a	b	c	d

En donde:

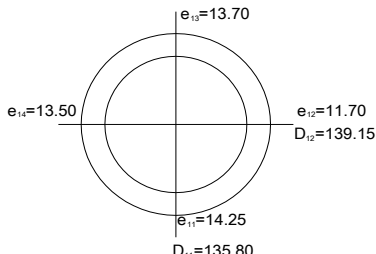
- a** **Departamento de origen del material (Tolima)**
- b** **Tipo de ensayo:**
 - V** Corte paralelo a la fibra
 - C** Compresión paralela a la fibra
 - T** Tracción paralela a la fibra
 - F** Flexión
 - Cp** Compresión perpendicular a la fibra
- c** **Número o cantidad de ensayos según su tipo:**
 - V** 76 ensayos
 - C** 75 ensayos
 - T** 75 ensayos
 - F** 12 ensayos
 - Cp** 75 ensayos
- d** **Posición del culmo de donde es obtenida la probeta:**
 - I** Inferior
 - M** Media
 - S** Superior

Figura 3.9: Nomenclatura usada para la identificación de las probetas usadas en cada ensayo.

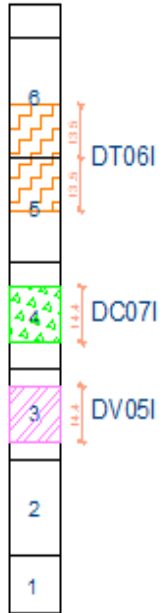
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ	INSTITUTO INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS LABORATORIO DE GUADUA Y MADERA FORMATO DE CARACTERIZACIÓN DE CÚLMOS Y ESQUEMA DE CORTE DE PROBETAS			IIT_LGM_FCEC	
				VERSION 2.0	
				PAGINA 2 DE 2	
PROYECTO	DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE ESFUERZOS ADMISIBLES DEL BAMBÚ GUADUA ANGUSTIFOLIA DE LOS DEPARTAMENTOS DE CAUCA, TOLIMA, NARIÑO Y SANTANDER			CÓDIGO QUIPU	20 30 100 16238
RESPONSABLE	ARQ. JORGE ENRIQUE LOZANO PEÑA			CÓDIGO INTERNO DE PROYECTO	CIP_001
LABORATORISTA	I.C. CÉSAR ARDILA PINILLA				
FECHA	27/09/2011	MUNICIPIO	(J) JUNÍN	No. CULMO	DJ6I
RESPONSABLE	I.C. CÉSAR ARDILA PINILLA	LONG. TOTAL UTIL (mL)	1.326		
ORIGEN	(D) TOLIMA	No. ENTRENUDOS	5	POSICION	(I) INFERIOR



$e_{23}=11.30$
 $e_{24}=11.25$
 $e_{22}=13.05$
 $D_{22}=133.65$
 $e_{21}=11.65$
 $D_{21}=133.50$



$e_{13}=13.70$
 $e_{14}=13.50$
 $e_{12}=11.70$
 $D_{12}=139.15$
 $e_{11}=14.25$
 $D_{11}=135.80$



DT06I
 DC07I
 DV05I

Figura 3.10: Formato para la caracterización de culmos y esquema de corte de probetas

Antes de realizar el corte en el culmo para la obtención de cada probeta, independiente del tipo de ensayo, es necesario identificar en el culmo el nudo o entrenudo destinado para tal fin, esto se hace mediante la caracterización del culmo y el esquema del corte de cada probeta a través del diligenciamiento de un formato digitalizado como se puede observar en la Figura 3.10. Así se logra identificar fácilmente el origen de cada probeta, la longitud del culmo, la longitud de la probeta, diámetro interno y externo del culmo, número de probetas y entrenudo en cada culmo.

Posterior a la identificación de las probetas para cada ensayo en particular se cortaron y alistaron como se indica en la NTC5525, en relación con la exactitud de los cortes para lograr una prueba válida, en la Figura 3.11 se pueden apreciar algunas de las probetas preparadas para los ensayos.

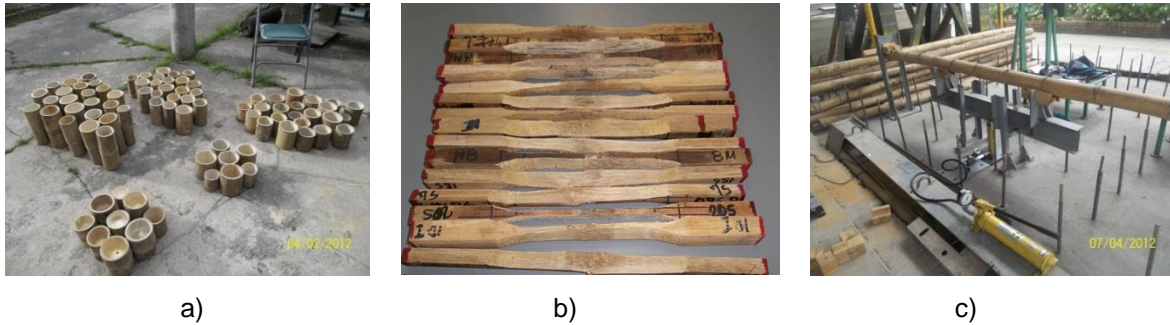


Figura 3.11: a) probetas para los ensayos de corte paralelo, compresión paralela y compresión perpendicular. b) probetas para ensayo de tracción paralela. c) probetas para el ensayo a flexión.

Antes de realizar los ensayos se sumergieron las probetas en agua por un período aproximado de dos semanas, esto con el fin de obtener valores conservadores de resistencia, particularmente en el ensayo de compresión paralela a la fibra como se podrá observar en el capítulo correspondiente a este, en donde se hace un análisis de la afectación del contenido de humedad en relación con su resistencia última. La Figura 3.12 muestra las probetas poco tiempo después de su inmersión en agua.



Figura 3.12: a) Inmersión de probetas a flexión. b) Inmersión probetas a compresión y corte.

4. Introducción a la determinación de los valores de esfuerzos admisibles

El presente Capítulo tiene como finalidad presentar el planteamiento metodológico empleado a lo largo de las pruebas mecánicas de laboratorio para determinar entre otras características del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima, su comportamiento ante diferentes sollicitaciones mecánicas y valores de esfuerzos admisibles. La cantidad de probetas dispuestas para los ensayos de esta investigación fueron trescientas doce (312), y se distribuyen como se indica en la Figura 4.1.

No. Probetas	Tipo de ensayo relativo a la dirección de la fibra
76	Corte paralelo (con nudo y sin nudo)
75	Compresión paralela
75	Tracción paralela
12	Flexión
74	Compresión perpendicular

Figura 4.1: Distribución de probetas para los diferentes tipos de ensayos.

Los ensayos de corte paralelo, compresión paralela, tracción paralela y flexión, fueron realizados de acuerdo con los parámetros establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC5525:2007 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth”. El ensayo de compresión perpendicular a la fibra se realizó con base en los parámetros usados en el proyecto de investigación desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia en el año de 2010 denominado “Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles” auspiciado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia; proyecto que se le nombrará a partir de ahora como Proyecto MADRC.

Los ensayos de corte paralelo, compresión paralela, tracción paralela y compresión perpendicular, relativos a la dirección de la fibra, fueron realizados en la máquina universal para ensayos mecánicos de capacidad de 20 toneladas marca HUNG TA INSTRUMENT GO. LTD. Modelo 2010 ubicada en el laboratorio del Instituto de Investigaciones Tecnológicas (IIT). El ensayo de flexión se realizó en un montaje adecuado para este tipo de ensayo en el Instituto de Extensión e Investigación (IEI).

Una vez realizados la totalidad de los ensayos para cada sollicitación mecánica y el posterior análisis estadístico de los resultados experimentales se procedió a determinar los valores admisibles; a partir del valor característico para cada uno de los ensayos.

Para la determinación del valor característico de todos los ensayos se usó la ecuación 4.1, tomada de la norma internacional ISO22156:2001 “Bamboo Structural Design” Numeral 7.2.1, la cual es la misma ecuación NSR-10 G.12.7–1.

$$R_{ki} = R_{0.05i} \left[1 - \frac{2.7 \frac{s}{m}}{\sqrt{n}} \right] \quad (4.1)$$

En donde:

R_{ki} = valor característico para cada sollicitación

$R_{0.05i}$ = percentil 5 de los datos de cada ensayo en la sollicitación i

s = desviación estándar de los datos del ensayo

m = promedio de los datos del ensayo

n = número de datos del ensayo

i = subíndice que indica el tipo de sollicitación mecánica: F para flexión, T para tracción paralela a las fibras, Cp para compresión perpendicular a la fibra, V para cortante paralelo a la fibra y C para compresión paralela a la fibra.

Una vez hallados los valores característicos para la totalidad de los ensayos de cada sollicitación mecánica, se determinaron los esfuerzos admisibles aplicando la ecuación 4.2, tomada de la NSR-10 G.12.7-2, y la Tabla G.12.7-3 , véase Figura 4.2.

$$F_i = \frac{FC}{(F_s)(FDC)} (f_{ki}) \quad (4.2)$$

En donde:

F_i = esfuerzo admisible en la sollicitación i

f_{ki} = valor característico del esfuerzo en la sollicitación i

FC = factor de reducción por diferencias entre las condiciones de los ensayos en el laboratorio y las condiciones reales de aplicación de las cargas en la estructura:

- 0.5 para el ensayo a tracción paralela
- 0.6 para el ensayo a corte paralelo

F_s = factor de Seguridad (véase Figura 4.2):

- 2.0 para el ensayo a flexión
- 2.0 para el ensayo a tracción paralela
- 1.5 para el ensayo a compresión paralela
- 1.8 para el ensayo a compresión perpendicular
- 1.8 para el ensayo a corte paralelo

FDC = factor de duración de carga (véase Figura 4.2):

- 1.5 para el ensayo a flexión
- 1.5 para el ensayo a tracción paralela
- 1.2 para el ensayo a compresión paralela
- 1.2 Para el ensayo a compresión perpendicular
- 1.1 para el ensayo a corte paralelo

i = lo mismo que en la ecuación 4.1

Factor	Flexión	Tracción	Compresión	Compresión ⊥	Corte
FC	-	0.5	-	-	0.6
F _s	2.0	2.0	1.5	1.8	1.8
FDC	1.5	1.5	1.2	1.2	1.1

Figura 4.2: NSR-10 / Tabla G.12.7-3 Factores de reducción.

A manera de aclaración: los valores de esfuerzos admisibles que fueron obtenidos en el Proyecto MADRC se determinaron aplicando la ecuación 4.3, tomada de la norma internacional ISO22156:2004 “Bamboo Structural Design”, la cual **NO** es la misma que se aplicó para este trabajo. Entonces, para poder hacer un comparativo directo entre los valores de los esfuerzos admisibles determinados tanto en un proyecto como en el otro, fue necesario recalcular los valores admisibles del proyecto MADRC con la ecuación 4.2, a partir de sus respectivos valores característicos.

$$\sigma_{admi} = \frac{G \times D}{S} R_{ki} \quad (4.3)$$

En donde:

σ_{admi} = esfuerzo admisible para cada solicitación

R_{ki} = valor característico para cada solicitación

G = coeficiente de modificación para la diferencia entre la calidad del laboratorio y la práctica; su valor predeterminado es 0.5

D = coeficiente de modificación por duración de la carga:

- 1.00 para carga permanente (M)
- 1.25 para carga permanente más carga temporal (M+V)
- 1.50 para carga permanente, más carga temporal, más carga de viento (M+V+W)

S = factor de seguridad; su valor predeterminado es 2.25

i = subíndice que indica el tipo de solicitación: F para flexión, T para tensión paralela a las fibras, C_p para compresión perpendicular a las fibras, V para cortante paralelo a la fibra y C para compresión paralela a la fibra.

5. Ensayo de contenido de humedad (CH)

La guadua como cualquier otro material de origen orgánico presenta condiciones particulares dependiendo su contenido de humedad, empezando por la diferencia de resistencia a las diferentes sollicitaciones mecánicas que puede llegar a experimentar a lo largo de su vida útil en una estructura. La determinación del contenido de humedad (CH) de la *Guadua angustifolia* Kunth como material de construcción es fundamental antes de su utilización en cualquier proyecto, ya que de allí depende uno de los principales parámetros normativos para el diseño; se trata de los coeficientes de modificación por contenido de humedad que afecta de manera negativa, a partir de un CH superior al 12%, los esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad, dependiendo el esfuerzo que sea sometido un miembro ³.

El presente Capítulo da a conocer los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para determinar el contenido de humedad (CH) de trecientas doce (312) muestras provenientes de las probetas de los diferentes ensayos mecánicos realizados en esta investigación. Se debe aclarar que para esta investigación todas las probetas seleccionadas para ensayar, antes de su respectivo ensayo, fueron sumergidas con dos o tres semanas de anterioridad en agua (ver Capítulo 3 “Preliminares”, Sub Capítulo 3.3 “Obtención de probetas”) esto con el fin de permitir primero la saturación del material y así obtener datos conservadores de resistencia, y segundo para obtener una comparación entre el contenido de humedad (CH) y la resistencia última (σ_{ult}) determinando tendencias según cada tipo de ensayo.

³ ASOCIACION COLOMBIANA DE INGIENERIA SISMICA, AIS. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Titulo G- Estructuras de madera y estructuras de guadua. Marzo de 2010.

Se debe comprender que la guadua una vez ha sido aprovechada comienza a perder agua a través de la evaporación, y tiende a secarse hasta alcanzar un contenido de humedad de equilibrio con su entorno o lugar donde es transportada una vez aprovechada; o que si el secado es mecánico y se logra bajar el contenido de humedad de la guadua por debajo del 12%, esta podrá ganar humedad si el sitio de disposición final tiene una humedad relativa del ambiente muy alta acompañada de una temperatura baja. Es decir, la guadua al igual que la madera expuesta a condiciones ambientales, desde el instante en que es aprovechada, empieza a perder o ganar humedad hasta llegar a un equilibrio con el ambiente.

Ciudad	HR%	T °C	ECH%
Armenia	77	22	15
Barranquilla	76	28	14
Bogotá	80	11	16
Bucaramanga	75	22	14
Buenaventura	87	28	18.5
Cali	75	24	12
Cartagena	79	28	15
Cúcuta	66	27	16
Ibagué	80	21	16
Manizales	78	18	13
Medellín	69	21	12
Montería	82	27	16
Neiva	67	26	16
Pasto	79	17	16
Pereira	75	22	14
Popayán	79	18	16
Quibdó	87	28	18.5
Sincelejo	77	28	15
Tunja	80	13	16
Turbo	85	27	17.5
Valledupar	70	28	13
Villavicencio	75	25	14

Figura 5.1: NSR-10 / Tabla G.D-1 Equilibrio de Contenido de Humedad (ECH) para las principales ciudades de Colombia.

En la Figura 5.1 se encuentra la Tabla G-D.1 de la NSR-10 donde se muestran los contenidos de humedad de equilibrio (ECH), junto con la humedad relativa (HR) y temperatura ambiente (T °C) para algunas de las principales ciudades de Colombia; sin embargo, se debe tener en cuenta que estos valores fueron determinados para madera y no para la *Guadua angustifolia* Kunth, así mismo, se debe considerar que su comportamiento individualmente como material estructural para la construcción de edificaciones es diferente, dependiendo su requerimiento físico-mecánico.

Siguiendo con los parámetros de la NSR-10, se ha dicho que la *Guadua angustifolia* Kunth usada en el diseño estructural no presenta corrección por contenido de humedad en ningún caso cuando su propio CH se encuentra en el 12%. Por ejemplo, en la Figura 5.2 se observa que para el CH menor o igual al 12% el coeficiente de modificación por contenido de humedad (C_m) es 1; o en otras palabras, presenta un 100% del valor de los esfuerzos admisibles ante las diferentes solicitaciones, como lo presenta la G12.7-1 (ver Figura 5.3). Ya para un CH mayor o igual al 19% el esfuerzo admisible para flexión y compresión paralela será apenas un 70%; el esfuerzo admisible para tracción, compresión perpendicular y corte paralelo será de un 80%; y así sucesivamente para los rangos de contenido de humedad en relación con los diferentes esfuerzos.

Esfuerzos		CH ≤ 12%	CH = 13%	CH = 14%	CH = 15%	CH = 16%	CH = 17%	CH = 18%	CH ≥ 19%
Flexión	F_b	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Tracción	F_t	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Compresión paralela	F_c	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Compresión perpendicular	F_p	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Corte	F_y	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Modulo de elasticidad	$E_{0.5}$	1.0	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.90
	$E_{0.05}$								
	E_{min}								

Figura 5.2: NSR-10 / Tabla G.12.7-5 coeficientes de modificación por contenido de humedad (C_m)

F_b Flexión	F_t Tracción	F_c Compresión	F_{p*} Compresión ⊥	F_v Corte
15	18	14	1.4	1.2

Figura 5.3: NSR-10 / Tabla G.12.7-1 esfuerzos admisibles F_i (MPa), CH=12%

El contenido de humedad (CH) para esta investigación se determinó conforme lo indica la NTC5525; en donde básicamente se determina a través del cálculo de la pérdida de masa de una muestra durante un proceso de secado artificial constante. Para ello las muestras seleccionadas para el ensayo de CH fueron extraídas de la porción de donde se hace evidente la falla en cada probeta usada para las diferentes solicitaciones de carga, siendo la cantidad de muestras usadas para el ensayo de contenido de humedad igual a la cantidad de probetas usadas para los diferentes ensayos mecánicos.

La Figura 5.4 da a conocer la secuencia del proceso para determinar el contenido de humedad de una muestra posterior a un ensayo.



a)

b)

c)

Figura 5.4: a) Elaboración de probeta en el ensayo de corte paralelo. b) Pesado de probeta en balanza con precisión de 0.01g. c) Diferentes estados de secado de probetas en horno electrónico.

Las muestras usadas para la determinación del contenido de humedad se pesaron con una exactitud de 0,01 g en una balanza digital marca PIONNER OHAUS, y posteriormente se introdujeron en el horno digital marca THELCO OVEN PRECISION para su secado a 103 °C de temperatura por un periodo de 24 horas en donde se registró el peso de su masa, posteriormente se hizo lo mismo a intervalos regulares hasta cuando la diferencia entre el último peso de la masa y su inmediatamente anterior no excediera 0,01 g. La ecuación 5.1 fue usada para determinar el contenido de humedad:

$$CH = \frac{m - m_o}{m_o} \times 100 \quad (5.1)$$

En donde:

m es la masa de la probeta antes del secado.

m_o es la masa de la probeta después del secado.

5.1 Resultados y análisis de datos (CH)

La Tabla 5.1 muestra los datos obtenidos a partir del análisis estadístico usado para determinar el contenido de humedad (CH) de muestras extraídas de todas las probetas ensayadas para las diferentes sollicitaciones mecánicas.

Tabla 5.1: Análisis estadístico para el contenido de humedad (CH) según el tipo de ensayo.

ENSAYO	DATOS ESTADÍSTICOS	VALORES
CORTE PARALELO	PROMEDIO (%)	100.60
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	11.61
	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	11.54
COMPRESIÓN PARALELA	PROMEDIO (%)	95.27
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	18.80
	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	19.73
	PROMEDIO (%)*	12.65
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)*	0.80
	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)*	6.36
TRACCIÓN PARALELA	PROMEDIO (%)	51.87
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	28.29
	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	54.55
	PROMEDIO (%)*	14.13
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)*	1.79
	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)*	12.65
FLEXIÓN	PROMEDIO (%)	19.91
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	7.45
	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	37.42
COMPRESIÓN PERPENDICULAR	PROMEDIO (%)	83.60
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	17.01
	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	20.34

* Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico

En esta investigación hubo dos grupos de probetas para los ensayos de tracción y compresión paralela; por un lado las que fueron instrumentadas con deformímetros eléctricos, y que se les determinó la resistencia última, el módulo de elasticidad longitudinal y el coeficiente de Poisson, este último sólo para el ensayo de compresión paralela, las cuales se señalan con un asterisco, y las que no fueron instrumentadas y que se destinaron sólo para hallar la resistencia última (ver Tabla 5.1).

Debido a que las probetas instrumentadas con los deformímetros eléctricos no debían presentar evidencia de agua superficial, ya que el deformímetro es adherido a la pared

externa de la probetas con pegamento epóxico el cual en presencia del agua es inútil, se debió sacar del agua a estas probetas para que se airearan por dos o tres días antes de instrumentarlas, por lo que su contenido de humedad bajó, y diferenció de aquellas probetas que permanecieron inmersas por dos o tres semanas, y que inmediatamente después fueron ensayadas, como se apreciará más adelante en los Capítulos 7 y 8 correspondientes a los ensayos de compresión y tracción paralela.

De acuerdo a lo anterior, el valor del contenido de humedad determinado para el ensayo de compresión y tracción paralela de muestras no-instrumentadas con deformímetro eléctrico muestran un promedio de 95.27% y 51.87% respectivamente, y para las probetas que fueron instrumentadas un promedio de 12.65% para compresión y 14.13 para tracción; evidenciando en ambos ensayos, sobretudo en el de compresión, una considerable diferencia de contenidos de humedad entre unas condiciones y otras, lo cual tendrá repercusiones en la determinación de los valores de sus esfuerzos admisibles, como se verá más adelante en los capítulos correspondientes a cada uno de estos ensayos. Así mismo, el contenido de humedad determinado para las muestras extraídas de los ensayos de compresión perpendicular y corte paralelo muestran un promedio de 83.60% y 100.60% respectivamente; se evidencia que sus coeficientes de variación son relativamente bajos 20.34% y 11.54% respectivamente, mostrando una correlación con su media aritmética menos dispersa, esto debido principalmente a que las probetas antes de su respectivo ensayo permanecieron inmersas en el agua aproximadamente el mismo tiempo, con diferencia de unas pocas horas entre ensayo y ensayo después de haber estado por dos o tres semanas en el agua, dando como resultado datos de contenidos de humedad en un rango más cerrado, esto se podrá apreciar con más detalle en los capítulos correspondientes a cada uno de estos ensayos.

Por último, el contenido de humedad determinado para las muestras extraídas de los ensayos a flexión muestra un promedio de 19.91%, lo que indica; o que su tiempo de exposición al agua fue el menor de todos los ensayos, o que no se realizaron los ensayos inmediatamente las probetas se sacaron del agua, así mismo su coeficiente de variación es de valor medio 37.42%, mostrando una correlación con su media aritmética homogénea en términos generales, esto se podrá apreciar más adelante en las tablas del capítulo correspondiente a este ensayo.

6. Ensayo de corte paralelo a la fibra (V)

Este Capítulo presenta los resultados obtenidos del ensayo a corte paralelo a las fibras de setenta y seis (76) probetas con y sin nudo extraídas de las secciones longitudinales tomadas de culmos de *Guadua angustifolia* Kunth provenientes del departamento de Tolima.

A partir de estos ensayos se determinaron y analizaron: el contenido de humedad (CH) promedio, la resistencia última (τ_{ultV}) promedio, el valor característico, y el esfuerzo admisible (τ_{ultV}). Así mismo, se determinó la relación que pudiera existir entre la resistencia última y el contenido de humedad al momento del ensayo. La Tabla 6.1 indica la distribución de las probetas ensayadas para determinar el esfuerzo último según su municipio de origen y parte del culmo de donde fueron extraídas.

Tabla 6.1: Distribución de las probetas ensayadas para determinar la resistencia última al corte paralelo a la fibra.

PARTE DE LA GUADUA	MUNICIPIO LUGAR DE ORIGEN								SUBTOTAL
	JUNÍN		LÍBANO		PALOCABILDO		VILLAHERMOSA		
	CON NUDO	SIN NUDO	CON NUDO	SIN NUDO	CON NUDO	SIN NUDO	CON NUDO	SIN NUDO	
INFERIOR	2	3	2	2	2	3	1	3	18
MEDIA	5	5	2	2	3	5	3	3	28
SUPERIOR	6	6	2	2	4	4	3	3	30
TOTAL									76

El procedimiento para la realización de estos ensayos se llevó a cabo siguiendo los parámetros de la NTC5525; por ello algunos de los resultados numéricos obtenidos después del ensayo de corte paralelo a la fibra fueron descartados del proceso de análisis, esto debido principalmente a que la falla de la probeta ocurrió fuera de la porción de ensayo. De igual manera se realizó un filtro a los resultados restantes, logrando una exclusión de datos atípicos a partir del criterio de Chauvenet.

La resistencia última de corte paralelo a las fibras se calculó con la ecuación 6.1.

$$\tau_{ultv} = \frac{F_{ultv}}{\sum(t \times L)} \quad (6.1)$$

En donde:

τ_{ultv} = resistencia última al corte, en MPa, con aproximación de una cifra decimal.

F_{ultv} = valor máximo de carga aplicada en la cual falla la probeta, en Kgf.

$\sum(t \times L)$ = suma de los cuatro productos del espesor (t) y altura (L) de la probeta.

Para este ensayo se apoyaron las probetas en su extremo inferior con sus respectivos platos que procuran la falla por corte. La Figura 6.1 ilustra la secuencia de este procedimiento.



Figura 6.1: Dispositivo en el ensayo de corte paralelo a la fibra.

Las probetas se ubicaron centradas en relación con los cuartos del plato de corte y la dirección de la carga; de igual modo el eje longitudinal de las probetas debían ser ortogonales respecto a su eje transversal, describiendo un rectángulo al apreciarlas en un corte longitudinal, esto para que la carga permaneciera distribuida sobre los platos de corte. Posteriormente se aplicó una carga muy pequeña con el propósito de acomodar la probeta, después se aplicó la carga de forma ininterrumpida durante prueba, con una velocidad de desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos de 0,01 mm/s.

La Figura 6.2 muestra la curva típica carga vs desplazamiento obtenida en el ensayo de corte paralelo a la fibra, en donde se puede evidenciar de manera general una falla súbita después de haber mantenido un desplazamiento lineal en relación con la carga.



Figura 6.2: Curva carga vs desplazamiento ensayo de corte paralelo a la fibra.

La Figura 6.3 muestra la falla típica para este ensayo en probetas con y sin nudo. En este trabajo se determinará si existe diferencia de resistencias al corte paralelo entre probetas con nudo frente a las que no tienen nudo; en basa, sobrebasa o varillón. Este con el fin de inferir si la presencia o no de nudo en la guadua es importante a la hora de definir su resistencia última frente al ensayo de corte paralelo a la fibra (V).

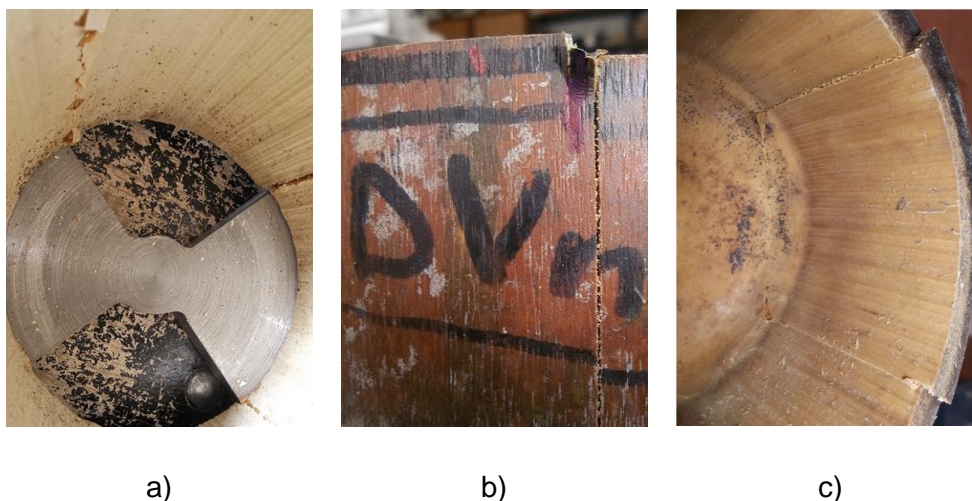


Figura 6.3: a) Probeta sin nudo fallada con tres áreas de corte. b) Vista externa de una probeta fallada. c) Probeta con nudo enfatizando la falla para observar la afectación en su diafragma.

La Tabla 6.2 presenta los resultados obtenidos, después de aplicar la exclusión de datos atípicos a partir del criterio de Chauvenet, de resistencia última de corte paralelo (τ_{ultV}) y el contenido de humedad (CH) de las probetas ensayadas. Las características físicas de cada probeta y mecánicas de cada ensayo; como longitudes, áreas, diámetros, espesores y carga última se hallan registrados en ANEXO 2: DVD CARPETAS 1, 2, 3 y 4.

Tabla 6.2: Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a corte paralelo a la fibra.

PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA								
INFERIOR			MEDIA			SUPERIOR		
PROBETA	τ_{ultV} (MPa)	CH (%)	PROBETA	τ_{ultV} (MPa)	CH (%)	PROBETA	τ_{ultV} (MPa)	CH (%)
DVn02I	4.15	111.00%	DVn02M	4.92	82.51%	DVn01S	6.35	103.46%
DVn03I	3.95	94.80%	DVn04M	2.28	89.17%	DVn03S	4.23	102.27%
DVn04I	6.05	104.93%	DVn05M	4.58	93.78%	DVn04S	5.70	114.98%
DVn05I	5.12	114.23%	DVn06M	3.85	96.22%	DVn05S	2.86	103.98%
DVn06I	3.94	94.78%	DVn07M	3.49	123.07%	DVn06S	3.36	58.85%
DVn07I	4.88	114.98%	DVn08M	6.50	106.26%	DVn07S	3.83	91.34%
DVn08I	5.29	100.63%	DVn09M	3.64	99.50%	DVn08S	3.45	100.56%
DV02I	5.08	98.37%	DVn12M	2.47	115.60%	DVn09S	3.77	111.15%
DV03I	5.58	81.55%	DVn13M	4.16	138.95%	DVn12S	5.31	102.45%
DV04I	4.72	101.02%	DVn14M	3.78	113.35%	DVn13S	5.87	96.77%
DV05I	4.89	80.17%	DVn15M	6.23	108.90%	DVn14S	5.32	96.09%
DV06I	5.18	102.90%	DV01M	5.93	104.54%	DVn15S	5.78	89.55%
DV07I	2.66	106.44%	DV02M	3.76	99.77%	DV01S	2.84	100.38%
DV08I	3.34	97.47%	DV03M	2.91	97.08%	DV02S	4.52	84.88%
			DV04M	3.41	104.72%	DV03S	3.44	93.01%
			DV06M	4.86	94.13%	DV04S	2.95	106.10%
			DV07M	3.09	98.73%	DV05S	5.43	106.33%
			DV08M	5.82	102.61%	DV06S	6.27	104.40%
			DV10M	4.65	89.70%	DV07S	5.11	107.38%
			DV11M	4.14	95.96%	DV08S	4.72	112.64%
			DV12M	4.31	112.27%	DV09S	5.36	96.80%
			DV13M	2.65	94.71%	DV10S	5.97	100.93%
			DV15M	3.59	99.11%	DV11S	3.22	100.92%
						DV12S	5.09	81.66%
						DV13S	4.88	103.43%
						DV14S	3.70	88.21%
						DV15S	6.34	116.04%

6.1 Resultados y análisis de datos (V)

Se realizó el análisis estadístico de los datos de resistencia última para cada porción de la guadua. La Tabla 6.3 presenta el análisis estadístico de resistencia última de corte paralelo para las probetas ensayadas; el valor característico a corte paralelo a la fibra mostrado en esta tabla se calculó usando la ecuación 4.1 (señalada en el Capítulo 4 de este trabajo “Introducción a la determinación de los valores de esfuerzos admisibles), tomada de la norma internacional ISO22156 “Bamboo Structural Design” Numeral 7.2.1, la cual es la misma ecuación (G.12.7–1) que usa la NSR-10. En la tabla, el número de datos corresponde a los que fueron usados para el análisis estadístico después de aplicar la exclusión de datos atípicos a partir del criterio de Chauvenet.

Tabla 6.3: Análisis estadístico del esfuerzo último a corte paralelo a la fibra.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA			TOTAL ZONA
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	
NÚMERO DE DATOS (N)	14	23	27	64
PROMEDIO (MPa)	4.63	4.13	4.65	4.46
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	0.92	1.18	1.16	1.13
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	19.82	28.51	24.92	25.31
PERCENTIL 5 (MPa)	3.10	2.49	2.89	2.69
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	2.66	2.09	2.51	2.46

Los resultados obtenidos muestran que existe una diferencia del 7.4% entre el esfuerzo último promedio de parte media y el total de la zona, y del 11% en relación con el promedio de la parte inferior y superior. Esta misma tendencia se observa con mayor énfasis en el valor característico, en donde existe una diferencia del 15% entre el esfuerzo de parte media y el total de la zona, y de casi el 20% en relación con el promedio de la parte inferior y superior. Se interpreta entonces que esta variación es representativa para el cálculo, por lo que se infiere que la distribución y concentración de las fibras en el sentido longitudinal afecta la resistencia en la parte media de la guadua para este tipo de sollicitación mecánica.

Una vez determinado el valor característico, se determinó el esfuerzo admisible para el ensayo de corte paralelo (V) aplicando la ecuación 6.2 (señalada completa en el Capítulo 4 de este trabajo “Introducción a la determinación de los valores de esfuerzos admisibles), tomada de la NSR-10 G.12.7-2, y la Tabla G.12.7-3 “factores de reducción” en relación con cada tipo de esfuerzo.

$$F_V = \frac{FC}{(F_s)(FDC)} (f_{kV}) \quad (6.2)$$

En donde:

F_V = esfuerzo admisible en la sollicitación ensayo a corte paralelo a la fibra
 f_{kV} = valor característico del esfuerzo en la sollicitación a corte paralelo a la fibra
 FC = factor de reducción por diferencias entre las condiciones de los ensayos en el laboratorio y las condiciones reales de aplicación de las cargas en la estructura:

- 0.6

F_s = factor de Seguridad:

- 1.8

FDC = factor de duración de carga:

- 1.1

V = subíndice para la sollicitación del ensayo a corte paralelo a la fibra

La Tabla 6.4 muestra el valor del esfuerzo admisible para el ensayo de corte paralelo a la fibra (V) determinado a través de la ecuación 6.2.

Tabla 6.4: Determinación del esfuerzo admisible a corte paralelo a la fibra.

ESFUERZO ADMISIBLE (MPa)	PARTE DE LA GUADUA			
	INFERIOR	MEDIA	SUPERIOR	TOTAL
F_V	0.81	0.63	0.76	0.74

La Tabla 6.5 muestra comparativamente los resultados obtenidos del valor característico (f_{kv}) y el esfuerzo admisible a corte paralelo a la fibra (F_v) para diferentes departamentos de Colombia y los encontrados en la NSR-10. En esta tabla se evidencia que Tolima posee un menor valor de esfuerzo admisible, en comparación con el valor encontrado en la NSR-10, y con los valores determinados para los departamentos de Quindío, Cundinamarca y Valle del Cauca en el Proyecto MADRC.

Tabla 6.5: Resultados obtenidos del esfuerzo admisible a corte paralelo a la fibra para diferentes departamentos de Colombia.

Año	AUTOR	ORIGEN	NÚMERO ENSAYOS	f_{kv} (MPa)	F_v (MPa)	CH%
2013	ARDILA	TOLIMA	64	2.46	0.74	100.60
2010	NSR-10	N/A	> 20	3.96	1.20	12.00
2010	Proyecto MADRC*	QUINDÍO	91	2.99	0.91	84.20
		C/MARCA	75	3.75	1.14	117.24
		V/CAUCA	80	4.52	1.37	99.00

*Estos valores, correspondientes al Proyecto MADRC, fueron tomados del documento original y recalculados con la ecuación 6.2, para compararlos directamente con los de este proyecto.

En este trabajo se determinó que la diferencia de resistencias al corte paralelo entre probetas con nudo frente a las que no tuvieron nudo fue de un 4.2% superior para las probetas con nudo, sin distinción por la sección de la guadua de donde fueron extraídas las probetas, basa, sobrebasa o varillón. Este resultado hace inferir, como ha ocurrido en otras investigaciones (Pantoja & Acuña, 2005), que la presencia o no de nudo en la guadua es intrascendente a la hora de definir su resistencia última frente al ensayo de corte paralelo a la fibra (V). La Tabla 6.6 contiene los datos del análisis estadístico para el contenido de humedad para las probetas ensayadas a corte paralelo a la fibra (tomada del Capítulo 5 “Ensayo de contenido de humedad” Tabla 5.1 de este texto).

Tabla 6.6: Análisis estadístico para el contenido de humedad para las probetas ensayadas a corte paralelo a la fibra.

ENSAYO	DATOS ESTADÍSTICOS	VALORES
CORTE PARALELO	PROMEDIO (%)	100.60
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	11.61
	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	11.54

Los resultados obtenidos muestran que el contenido de humedad promedio es de 100.60%, y un coeficiente de variación relativamente bajo de 11.54%, esto se puede interpretar como una dispersión de datos homogénea, a pesar que hubo una diferencia entre los datos de mayor y menor valor, no se alejaron demasiado de su media aritmética; esto debido a que las probetas antes de su respectivo ensayo permanecieron inmersas en el agua aproximadamente el mismo tiempo unas con otras, con diferencia de unas pocas horas entre ensayo y ensayo después de haber estado más de tres semanas inmersas en agua. En la Figura 6.4 se puede apreciar la gráfica de la resistencia última del ensayo de corte paralelo a la fibra (τ_{ultV}) vs el contenido de humedad. La agrupación de puntos de esta gráfica permite observar que no existe una tendencia definida, es decir, que **no hay una relación directa entre la resistencia al corte paralelo a la fibra y su respectivo contenido de humedad** en el rango de ensayo; ya que el área en la gráfica muestra una dispersión de puntos homogénea, que comprende los rangos de resistencia de 1.6 a 6.6 MPa, y los rangos del 80% al 120% de contenido de humedad.

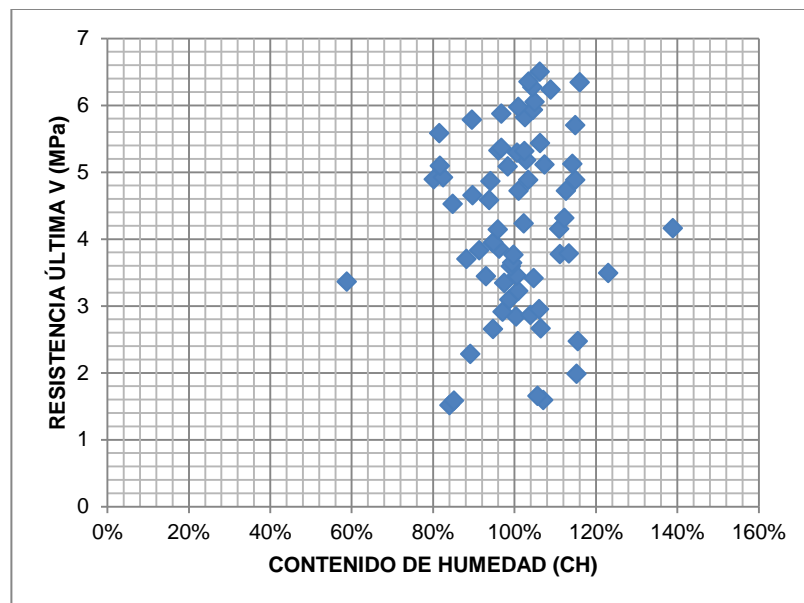


Figura 6.4: Resistencia última ensayo corte paralelo (τ_{ultV}) vs contenido de humedad (CH).

Esta distribución (Figura 6.4), da una idea general del comportamiento del material ante este tipo de sollicitación mecánica solo frente a un rango determinado de contenido de humedad; por este motivo, hacen falta trabajos en donde no sólo se consideren las tendencias entre estos rangos, sino que se definan criterios con los que estén más acordes con la realidad de un diseño estructural, entre el rango del 12% al 19% de CH.

En el Proyecto MADRC se obtuvo un valor promedio de resistencia a corte paralelo de 5.66 MPa y un valor característico de 2.99 MPa, para 91 probetas extraídas de guaduas del Quindío; igualmente obtuvo un valor promedio de resistencia a corte paralelo de 5.52 MPa y un valor característico de 3.75 MPa, para 75 probetas extraídas de guaduas provenientes de Cundinamarca; así mismo obtuvo un valor promedio de resistencia a corte paralelo de 6.44 MPa y un valor característico de 4.52 MPa, para 80 probetas extraídas de guaduas del Valle del Cauca, con un contenido de humedad promedio de 98%. Lamus (2008) obtuvo un valor promedio de resistencia a corte paralelo de 7.47 MPa y un valor característico de 4.38 MPa, para 38 probetas extraídas de guaduas del Eje Cafetero, el contenido de humedad promedio al momento del ensayo pudo estar cerca al ECH=16% para Bogotá. Acuña & Pantoja (2005) obtuvieron un valor promedio de resistencia a corte paralelo de 7.1 MPa para 368 probetas extraídas de guaduas de tres departamentos distribuidos así: Cundinamarca que obtuvo un valor un valor característico de 4.9 MPa para 121 probetas; Cauca que obtuvo un valor característico de 3.9 MPa para 120 probetas; y Quindío que obtuvo un valor característico de 5.2 MPa para 127 probetas, el contenido de humedad promedio al momento del ensayo de las probetas pudo estar cerca al ECH=16% para Bogotá.

Las diferencias entre los valores obtenidos en esta investigación en relación con los otros autores podrían parecer consecuencia directa del contenido de humedad promedio, sin embargo, en esta y otras investigaciones no se ha evidenciado que exista una relación directa entre el contenido de humedad y la resistencia al corte paralelo; Acuña & Pantoja (2005) comentan: “Haciendo una relación entre la humedad y la resistencia al corte en cada una de las fuentes se observa que estos parámetros no tienen una relación constante o proporcional. El hecho de que la guadua tenga mayor o menor humedad no garantiza que haya mayores resultados en la resistencia última al corte”. La justificación más cercana a estas discrepancias, entre los diferentes autores podría estar por un lado en el lugar de procedencia del material en relación con su altitud, temperatura o humedad relativa, y por otro a la metodología empleada por cada uno de ellos, y la calibración del equipo usado para los ensayos. Para el caso particular de esta investigación se usaron herramientas y equipos de última tecnología en todas las etapas del ensayo, cuidando con escrutinio cada paso de avance del proyecto, no obstante los valores de resistencia obtenidos en esta investigación son los más bajos, y se alejan de manera considerable de los valores que presenta la NSR-10.

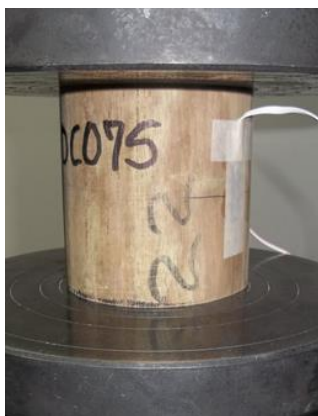
7. Ensayo de compresión paralela a la fibra (C)

Para determinar la resistencia última del bambú *Guadua angustifolia* Kunth ante sollicitaciones de compresión paralela a la fibra, se ensayaron setenta (70) probetas distribuidas de la forma indicada en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Distribución de las probetas ensayadas a compresión paralela a la fibra para determinar el esfuerzo último.

PARTE DE LA GUADUA	MUNICIPIO LUGAR DE ORIGEN				SUBTOTAL
	JUNÍN	LÍBANO	P/CABILDO	V/HERMOSA	
INFERIOR	4	4	2	4	14
MEDIA	7	5	7	9	28
SUPERIOR	7	7	10	4	28
TOTAL					70

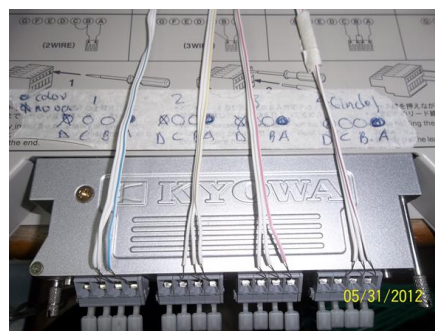
La preparación y ensayo de las probetas se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC5525. La Figura 7.1 ilustra la instrumentación con deformímetros eléctricos de las probetas ensayadas a compresión paralela a la fibra para determinar su módulo de elasticidad longitudinal y su relación de Poisson.



a)



b)



c)

Figura 7.1: a) Instrumentación con deformímetro unidireccional. b) Instrumentación con deformímetro multidireccional o tipo roseta. c) Adquisidor de datos.

Para determinar el módulo de elasticidad longitudinal a compresión paralela a la fibra del material, fueron instrumentadas treinta y dos (32) probetas con deformímetros eléctricos para medir la deformación en la dirección de las fibras; la distribución de estas probetas se indica en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Distribución de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico para determinar el módulo de elasticidad longitudinal a compresión paralela a la fibra.

PARTE DE LA GUADUA	MUNICIPIO LUGAR DE ORIGEN				SUBTOTAL
	JUNÍN	LÍBANO	P/CABILDO	V/HERMOSA	
INFERIOR	2	4	2	2	10
MEDIA	2	6	0	3	11
SUPERIOR	2	4	3	2	11
TOTAL					32

Así mismo, para determinar el coeficiente de Poisson del material fueron instrumentadas doce probetas con deformímetros eléctricos tipo roseta en la dirección paralela y perpendicular respecto de la dirección de las fibras; estas probetas hacían parte de las treinta y dos probetas anteriores (Tabla 7.2), su distribución se muestra en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3: Distribución de las probetas instrumentadas para determinar el coeficiente de Poisson del ensayo a compresión paralela a la fibra.

PARTE DE LA GUADUA	MUNICIPIO LUGAR DE ORIGEN				SUBTOTAL
	JUNÍN	LÍBANO	P/CABILDO	V/HERMOSA	
INFERIOR	1	1	1	1	4
MEDIA	1	1	0	2	4
SUPERIOR	1	1	1	1	4
TOTAL					12

El procedimiento para la realización de estos ensayos se llevó a cabo siguiendo los parámetros de la NTC5525; por ello algunos de los resultados numéricos obtenidos después del ensayo de corte paralelo a la fibra fueron descartados del proceso de análisis, esto debido principalmente a que la falla de la probeta ocurrió de forma anómala. De igual manera se realizó un filtro a los resultados restantes, logrando una exclusión de datos atípicos a partir del criterio de Chauvenet.

La Figura 7.2 muestra la curva típica carga vs desplazamiento obtenida en el ensayo a compresión paralela a la fibra, en donde se puede evidenciar de manera general una falla dúctil después de haber mantenido un desplazamiento lineal en relación con la carga.

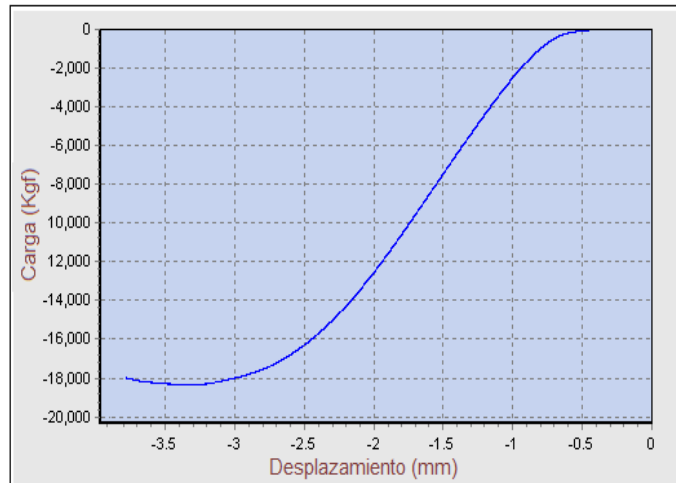


Figura 7.2.: Curva carga vs desplazamiento ensayo de compresión paralela a la fibra.

La Figura 7.3 presenta la falla típica de la probeta en el ensayo de compresión paralela a la fibra; allí se observa un aplastamiento de las paredes hacia la parte media de la probeta.

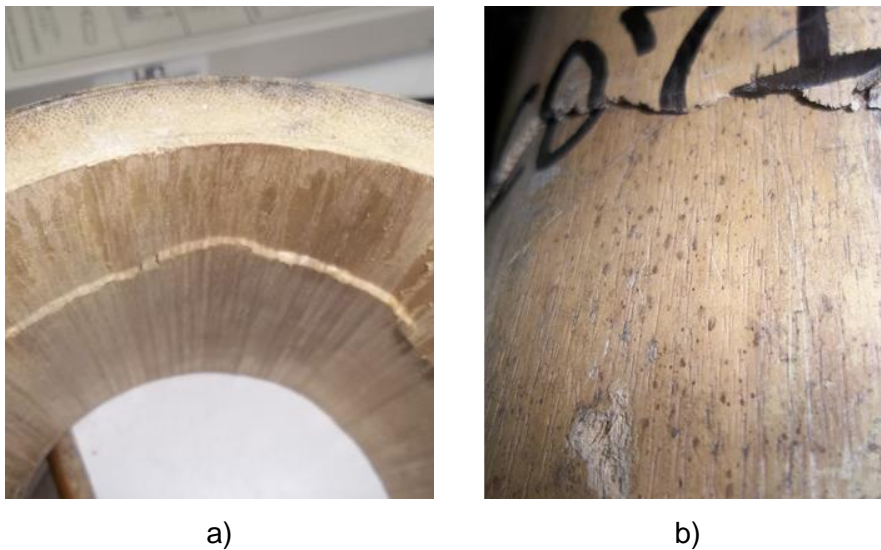


Figura 7.3: a) Interior de la probeta fallada. (b) vista externa de la probeta fallada.

El esfuerzo último de compresión paralela a la fibra se calculó utilizando la ecuación 7.1 en donde σ_{ultC} es el esfuerzo último de compresión paralela a la fibra, F_{ultC} es la carga de falla de la probeta y A es el área de la sección transversal de la probeta.

$$\sigma_{ultC} = \frac{F_{ultC}}{A} \quad (7.1)$$

Los datos obtenidos experimentalmente de esfuerzo y deformación fueron graficados para la determinación del módulo de elasticidad a compresión paralela el cual teóricamente corresponde a la pendiente de dicha curva; según la NTC5525 las deformaciones deben ser medidas con dos deformímetros posicionados en lados opuestos de la probeta, por tanto el módulo de elasticidad longitudinal a compresión paralela a la fibra corresponde al promedio de las pendientes obtenidas con las lecturas de cada deformímetro eléctrico longitudinal. La Figura 7.4 presenta un ejemplo de este tipo de gráficos.

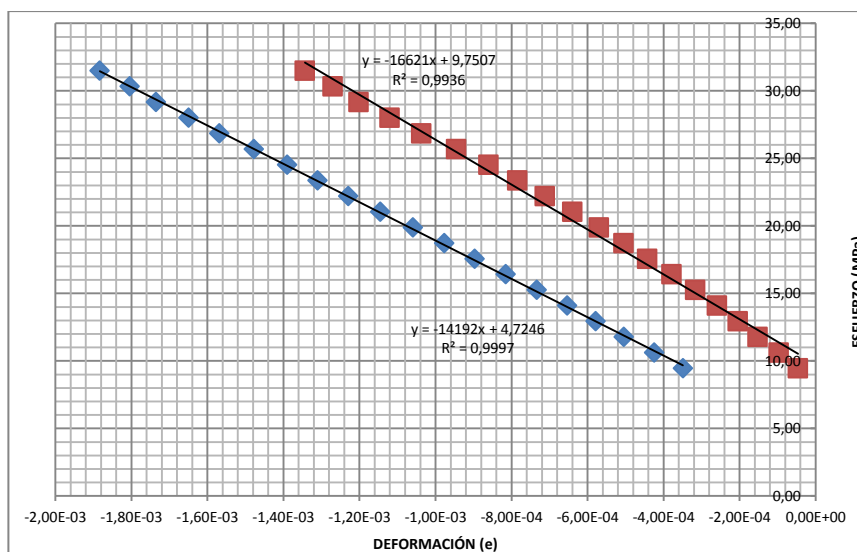


Figura 7.4: Diagrama esfuerzo vs deformación longitudinal de probetas ensayadas a compresión paralela a la fibra para determinar el módulo de elasticidad.

Con los datos de esfuerzo y deformación longitudinal y transversal obtenidos en los ensayos realizados, para determinar el coeficiente de Poisson (ν_c) fueron realizadas gráficas esfuerzo deformación, como la presentada en la Figura 7.5.

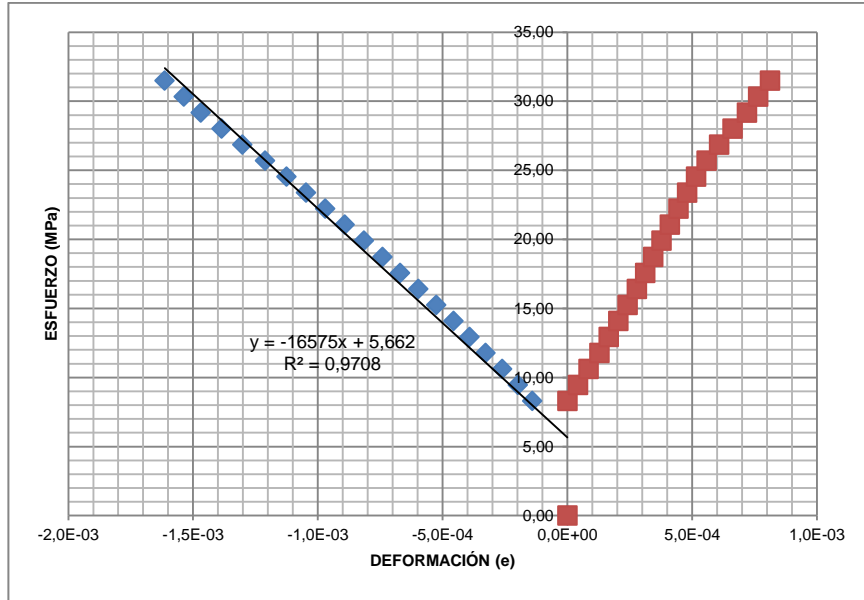


Figura 7.5: Diagrama esfuerzo vs deformación longitudinal y transversal de probetas ensayadas a compresión paralela a la fibra.

Teóricamente el coeficiente de Poisson corresponde a la relación entre las deformaciones transversales (ϵ_y) y las longitudinales (ϵ_x), tal como es presentado en la ecuación 7.2.

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (7.2)$$

La Tabla 7.4 presenta los resultados obtenidos de resistencia última (σ_{ultC}) y contenido de humedad (CH) de las probetas ensayadas no-instrumentadas. Como ya se había mencionado, algunos de los resultados numéricos obtenidos después del ensayo de compresión paralela a la fibra fueron descartados del proceso de análisis mediante un filtro logrando la exclusión de datos atípicos a partir del criterio de Chauvenet. Los formatos que contienen los datos básicos de cada probeta, como: diámetros, espesores, carga última, y demás información consignada durante este ensayo se encuentran en el ANEXO 2: DVD CARPETAS 1, 2, 3 y 4.

Tabla 7.4: Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a compresión paralela de las probetas no-instrumentadas.

PARTE DE LA GUADUA								
INFERIOR			MEDIA			SUPERIOR		
PROBETA	σ_{ultC} (MPa)	CH (%)	PROBETA	σ_{ultC} (MPa)	CH (%)	PROBETA	σ_{ultC} (MPa)	CH (%)
DC06I	26.98	102.95%	DC01M	26.86	88.53%	DC02S	32.46	67.82%
DC09I	31.20	87.91%	DC02M	27.32	88.50%	DC03S	22.80	112.51%
DC13I	22.47	103.99%	DC3M	11.95	113.19%	DC04S	15.04	83.97%
			DC05M	23.80	101.26%	DC06S	16.44	70.74%
			DC06M	31.62	84.63%	DC09S	14.56	92.82%
			DC07M	29.41	85.07%	DC10S	35.64	84.85%
			DC08M	28.15	89.61%	DC11S	30.03	81.53%
			DC10M	11.25	102.74%	DC12S	13.78	126.26%
			DC11M	18.26	78.95%	DC16S	24.37	92.76%
			DC12M	19.20	122.83%	DC17S	15.71	79.20%
			DC13M	28.23	89.63%	DC19S	32.06	101.00%
			DC14M	16.42	121.52%	DC24S	24.57	85.81%
			DC15M	29.78	82.98%	DC25S	23.03	106.53%
			DC16M	16.05	128.78%	DC26S	46.79	62.01%
			DC18M	32.89	86.19%	DC29S	26.72	112.87%
			DC20M	27.48	98.54%			
			DC30M	24.54	86.36%			

La Tabla 7.5 presenta los resultados obtenidos de resistencia última (σ_{ultC}), módulo de elasticidad longitudinal (E_{promC}), coeficiente de Poisson (ν_C) y contenido de humedad (CH) de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

Tabla 7.5: Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a compresión paralela de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

PARTE DE LA GUADUA														
INFERIOR					MEDIA					SUPERIOR				
PROBETA	σ_{ultC} (MPa)	E_{promC} (MPa)	ν	CH (%)	PROBETA	σ_{ultC} (MPa)	E_{promC} (MPa)	ν	CH (%)	PROBETA	σ_{ultC} (MPa)	E_{promC} (MPa)	ν	CH (%)
DC01I	36.22	19772.3		13.97%	DC04M	54.55	15540.9		12.36%	DC01S	48.00	15471.7	0.52	12.68%
DC03I	41.35	11468.8		12.56%	DC09M	43.09	18433.0		11.12%	DC05S	45.86	16842.4		12.60%
DC04I	53.09	19168.4	0.16	12.88%	DC17M	59.07	13880.2		75.50%	DC07S	39.19	15019.1		12.15%
DC07I	32.88	11556.5		13.62%	DC23M	54.44	17151.6		12.91%	DC08S	46.43	25764.2		11.95%
DC08I	37.64	22995.0		12.69%	DC24M	51.18	20263.8	0.14	12.94%	DC13S	56.18	20604.9		12.62%
DC10I	34.03	19114.2		12.91%	DC25M	64.44	21845.6	0.43	12.55%	DC14S	49.27	22254.1	0.74	12.58%
DC11I	43.79	12204.8		12.15%	DC27M	37.52	16490.7		12.29%	DC18S	46.15	17073.6		12.10%
DC12I	41.08	23082.3		11.77%	DC28M	37.07	11660.7		51.61%	DC20S	53.40	22718.7		12.83%
DC14I	39.03	13562.1		13.16%	DC29M	48.75	15054.8		12.57%	DC23S	42.45	12084.0		12.66%
										DC28S	51.54	19458.1	0.58	12.77%

7.1 Resultados y análisis de datos (C)

Se realizó el análisis estadístico de los datos obtenidos experimentalmente de resistencia última (σ_{ultC}) del ensayo a compresión paralela a la fibra para cada sección de la guadua del departamento de Tolima. Como ya se había indicado anteriormente en el Capítulo 5 “Ensayo de contenido de humedad CH”, en la presente investigación se trabajó con dos grupos de probetas en el ensayo de compresión paralela, por un lado las que fueron instrumentadas con deformímetros eléctricos para determinar el módulo de elasticidad longitudinal del material, el coeficiente de Poisson y de paso su resistencia última, las cuales presentaron un valor promedio de contenido de humedad del 12.65%. Y por otro lado las probetas que no fueron instrumentadas con deformímetro eléctrico, y que se usaron para determinar la resistencia última, las cuales presentaron un valor promedio de contenido de humedad del 95.27%, como se podrá observar más adelante en este capítulo.

La Tabla 7.6 presenta el análisis estadístico de resistencia última a compresión paralela a la fibra para las probetas no-instrumentadas con deformímetro eléctrico, el valor característico se calculó usando la ecuación 4.1 (señalada en el Capítulo 4, tomada de la norma internacional ISO22156 “Bamboo Structural Design” Numeral 7.2.1, la cual es la misma ecuación que se usa en la NSR-10 G.12.7–1.

Tabla 7.6: Análisis estadístico del esfuerzo último a compresión paralela a la fibra para probetas no-instrumentadas con deformímetro eléctrico.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA			TOTAL ZONA
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	
NÚMERO DE DATOS (N)	3	17	15	35
PROMEDIO (MPa)	26.88	23.72	24.93	24.51
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	4.37	6.84	9.35	7.75
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	16.24	28.86	37.51	31.62
PERCENTIL 5 (MPa)	22.92	11.81	14.33	13.23
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	17.12	9.58	10.58	11.32

En la Tabla 7.6 además se observa de manera general, que el valor promedio varía de forma no-lineal a lo largo de la longitud de la guadua; es decir, se evidencia que en la medida que avanza la guadua, de la parte inferior a la parte superior, el valor promedio

decrece hacia la parte media, pero se incrementa hacia la parte superior. El valor característico presenta la misma tendencia pero más enfatizada; en donde la parte inferior presenta un considerable incremento del 44% en relación con el valor de la parte media, de casi el 38% con la parte superior, y un 34% respecto al total de la zona. Esta desproporción se justifica parcialmente desde el punto de vista estadístico, debido a la diferencia entre el número de muestras en parte inferior y las de las otras dos partes, así como la diferencia del percentil 5; que afectan considerablemente el cálculo del valor característico (ver ecuación 4.1). Por ello solo es conviene comparar la parte media con la parte superior de la guadua, en donde se observar un incremento del 9.5% de la parte superior en relación con la parte media.

La Tabla 7.7 presenta el análisis estadístico de resistencia última a tracción paralela para las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico, el valor característico se calculó usando la ecuación 4.1, (señalada en el Capítulo 4 de este trabajo).

Tabla 7.7: Análisis estadístico del esfuerzo último a compresión paralela a la fibra para probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA			TOTAL ZONA
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	
NÚMERO DE DATOS (N)	9	9	10	28
PROMEDIO (MPa)	39.90	50.01	47.85	45.99
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	6.08	9.39	5.04	8.04
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	15.24	18.77	10.54	17.47
PERCENTIL 5 (MPa)	33.34	37.25	40.66	34.80
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	28.77	30.96	37.00	31.69

Observando los resultados obtenidos, en esta tabla se analiza que el valor característico varía de forma considerable a lo largo de la longitud de la guadua, particularmente la parte superior que presenta un incremento de más del 22% en relación con la parte inferior, del 16% con la parte media, y de un 14.4% en relación con toda la zona; se observa un incremento de su valor en la medida que aumenta la altura de la guadua. Esto debe ser consecuencia por la mayor cantidad de fibras por área transversal que se presenta en la guadua en la medida que va disminuyendo su espesor de pared al incrementar en altura. Una tendencia similar se ha considerado en otras investigaciones: El Proyecto MADRC “Observando los resultados obtenidos, el valor característico a

compresión paralela varía a lo largo de la longitud de la guadua, siendo menor en la porción inferior y mayor en la superior; este comportamiento es observado con los resultados experimentales de cada zona como para las tres zonas en conjunto". González (2006) "La variación de la resistencia a compresión para en diferentes partes del culmo (cepas, basas y sobrebasas) es del -10%, 1%, 6% del valor promedio. El culmo al desarrollarse en altura aumenta en resistencia debido a la disminución del espesor de las paredes del mismo".

Una vez determinado el valor característico, se determinó el valor del esfuerzo admisible para el ensayo de compresión paralela (C) por la ecuación 7.3, señalada completa en el Capítulo 4 de este trabajo, tomada de la NSR-10 G.12.7-2, y la Tabla G.12.7-3 "factores de reducción" en relación con cada tipo de esfuerzo.

$$F_C = \frac{FC}{(F_s)(FDC)} (f_{kC}) \quad (7.3)$$

En donde:

F_C = esfuerzo admisible para compresión paralela a la fibra

f_{kC} = valor característico del esfuerzo para compresión paralela a la fibra

FC = factor de reducción por diferencias entre las condiciones de los ensayos en el laboratorio y las condiciones reales de aplicación de las cargas en la estructura:

- 1.0 ensayo a compresión paralela a la fibra

F_s = factor de Seguridad:

- 1.5 ensayo a compresión paralela a la fibra

FDC = factor de duración de carga:

- 1.2 ensayo a compresión paralela

C = subíndice para compresión paralela a las fibra

La Tabla 7.8 muestra el valor del esfuerzo admisible para el ensayo de compresión paralela a la fibra (C) determinado a través de la ecuación 7.3.

Tabla 7.8: Determinación esfuerzo admisible compresión paralela a la fibra por ecuación 7.3.

ESFUERZO ADMISIBLE (MPa)	PARTE DE LA GUADUA				CH%
	INFERIOR	MEDIA	SUPERIOR	TOTAL	
F_c	9.51	5.32	5.88	6.29	95.27
F_c^*	15.98	17.20	20.55	17.61	12.65

* Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico

La Tabla 7.9 muestra comparativamente los resultados obtenidos del valor característico (f_{kc}) y el esfuerzo admisible a compresión paralela a la fibra (F_c) para diferentes departamentos de Colombia y los encontrados en la NSR-10; determinados todos ellos a través de la ecuación 7.3. Allí se evidencia que Tolima posee un menor valor de esfuerzo admisible a la compresión paralela a la fibra de las probetas que no fueron instrumentadas, en comparación con el valor encontrado en la NSR-10, y con los valores determinados para los departamentos de Quindío, Cundinamarca y Valle del Cauca en el Proyecto MADRC.

Tabla 7.9: Resultados obtenidos del esfuerzo admisible a compresión paralela a la fibra para diferentes departamentos de Colombia determinados a través de la ecuación 7.3.

AÑO	AUTOR	ORIGEN	NÚMERO ENSAYOS	f_{kc} MPa	F_c MPa	CH %
2013	ARDILA	TOLIMA	35	12.84	6.29	95.27
			28*	31.69*	17.61*	12.65*
2010	NSR-10	N/A	> 20	25.45	14.00	12.00
2010	Proyecto MADRC**	QUINDÍO	76	19.51	10.84	65.33
		C/MARCA	70	20.57	11.43	102.66
		V/CAUCA	74	21.76	12.10	99.44

**Los valores señalados correspondientes al Proyecto MADRC fueron modificados en su ecuación original la 4.3, y recalculados con la ecuación 7.3, con el fin de comparar los resultados bajo los mismos parámetros. *Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

El Proyecto MADRC determinó un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de compresión paralela a la fibra de 33.89 MPa y un valor característico de 19.51 MPa, para 76 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Quindío. Igualmente

obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de compresión paralela a la fibra de 32.28 MPa y un valor característico de 20.57 MPa, para 70 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Cundinamarca. Así mismo obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de compresión paralela a la fibra de 32.38 MPa y un valor característico de 21.76 MPa, para 74 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento del Valle del Cauca, con un contenido de humedad promedio de los tres departamentos de 89.08%. Lamus (2008) obtuvo un valor promedio de resistencia a compresión paralela de 54.80 MPa y un valor característico de 36.60 MPa para 40 probetas extraídas de guaduas provenientes del Eje Cafetero y González (2006) obtuvo un valor promedio de resistencia a compresión paralela de 56.21 MPa y un valor característico de 40.42 MPa, para probetas extraídas de guaduas provenientes de los departamentos de Caldas y Quindío.

La Tabla 7.10 presenta el análisis estadístico de módulo de elasticidad para las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico ensayadas a compresión paralela a la fibra. En la tabla el número de datos corresponde a los que fueron usados para el análisis estadístico luego de la exclusión de los datos atípicos usando el criterio de Chauvenet.

Tabla 7.10: Análisis estadístico para el módulo de elasticidad longitudinal a compresión paralela.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA			TOTAL ZONA
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	
NÚMERO DE DATOS (N)	9	9	10	28
PROMEDIO (MPa)	16991.59	16702.35	18729.08	17519.15
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	4806.64	3158.83	4172.90	4057.56
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	28.29	18.91	22.28	23.16
PERCENTIL 5 (MPa)	11503.84	12548.45	13404.80	11592.93
VALOR MÍNIMO (MPa)	11468.76	11660.65	12083.97	11468.76

Los resultados muestran una variación en los valores del módulo de elasticidad a compresión paralela a la fibra para cada parte de la guadua en el percentil 5, con tendencia a aumentar en la medida que incrementa en altura, de inferior a superior; esta misma tendencia se observa en el valor mínimo. El Proyecto MADRC obtuvo un valor promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de compresión paralela a la fibra de 10169 MPa, y con una desviación estándar de 6175 MPa, para 58 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Quindío. Igualmente obtuvo un valor

promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de compresión paralela a la fibra de 8008 MPa, y con una desviación estándar de 5791 MPa, para 35 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Cundinamarca. Así mismo obtuvo un valor promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de compresión paralela a la fibra de 8117 MPa, y con una desviación estándar de 4495 MPa, para 42 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento del Valle del Cauca. Los valores determinados para el módulo de elasticidad longitudinal en este trabajo presentan variaciones considerables en relación con los valores determinados en el Proyecto MADRC; esto puede ocurrir debido a que en este trabajo hubo un promedio menor del valor de contenido de humedad (CH) que en el Proyecto MADRC. La Tabla 7.11 presenta el análisis estadístico de los datos obtenidos experimentalmente para el Coeficiente de Poisson (ν_c) de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico multidireccional o tipo roseta.

Tabla 7.11: Análisis estadístico para determinar el coeficiente de Poisson a compresión paralela a la fibra.

DATOS ESTADÍSTICOS DE 6 MUESTRAS	
PROMEDIO	0.43
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.24
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	55.81

El Proyecto MADRC obtuvo un valor promedio para el coeficiente de Poisson en el ensayo de compresión paralela a la fibra de 0.35, con una desviación estándar de 0.07, y un coeficiente de variación de 19.97 para 22 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Quindío, Cundinamarca y Valle del Cauca. Por otra parte Ghavami y Marinho (2005) obtuvo un promedio de 0.34 para el coeficiente de Poisson de la *Guadua angustifolia* para probetas con y sin nudo ensayadas a compresión paralela a la fibra cuya altura era igual a su diámetro. El valor promedio obtenido del coeficiente de Poisson para el departamento de Tolima difiere en un 20% aproximadamente con respecto al promedio encontrado por el Proyecto MADRC, o/y por Ghavami y Marinho (2005). La Tabla 7.12 contiene los datos del análisis estadístico para el contenido de humedad de las probetas ensayadas a compresión paralela instrumentadas y no-instrumentadas con deformímetro eléctrico; según este resultado el contenido de humedad para los ensayos a compresión paralela de probetas no-instrumentadas muestra un promedio de 95.27%; este promedio no es extraño en este tipo de ensayos bajo las condiciones anteriormente

señaladas, así mismo su coeficiente de variación del 19.73%, por una dispersión de datos medianamente distante en relación con su media aritmética. Así mismo, se observa un promedio de contenido de humedad de 12.65% para las probetas instrumentadas, y su coeficiente de variación es relativamente bajo 6.36%, aludiendo una dispersión de datos cerrada en relación con su media aritmética.

Tabla 7.12: Análisis estadístico del contenido de humedad para probetas instrumentadas y no-instrumentadas ensayadas a compresión paralela.

DATOS ESTADÍSTICOS	VALORES	
	No-instrumentadas	Instrumentadas
PROMEDIO (%)	95.27	12.65
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	18.80	0.80
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	19.73	6.36

Como ya se había mencionado en el Capítulo 4; debido a que las probetas instrumentadas debían estar secas superficialmente para que el deformímetro fuera adherido apropiadamente con pegamento epóxico, se sacaron del agua estas probetas para que se airearan por dos o tres días antes de instrumentarlas, por lo que su CH se diferenció de aquellas probetas que permanecieron inmersas por dos o tres semanas y que inmediatamente fueron ensayadas. En la Figura 7.6 se puede apreciar la gráfica de la resistencia última del ensayo a compresión paralela a la fibra vs el contenido de humedad de las probetas que no fueron instrumentadas con deformímetros eléctricos.

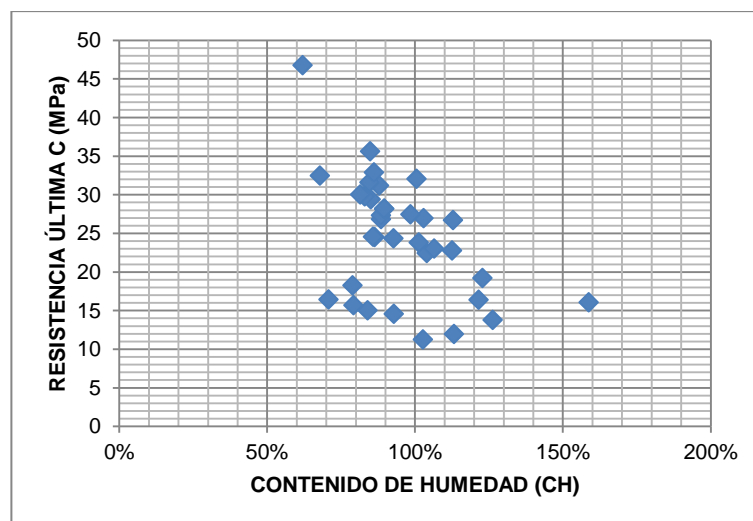


Figura 7.6: Resistencia última ensayo compresión paralela (C) vs contenido de humedad (CH), de las probetas no-instrumentadas.

La agrupación de puntos de esta gráfica permite observar que no existe una tendencia definida, es decir, **no hay una relación directa entre la resistencia a la compresión paralela a la fibra y su respectivo contenido de humedad**, ya que el área en la gráfica muestra una dispersión de puntos homogénea, que comprende los rangos de contenido de humedad comprendidos del 80% al 110%, en donde se aprecia que la resistencia no se ve afectada, involucrando los esfuerzos que van desde los 15 a los 35 MPa aproximadamente.

En la Figura 7.7 se puede apreciar la gráfica de la resistencia última del ensayo a compresión paralela a la fibra vs el contenido de humedad de las probetas que fueron instrumentadas con deformímetros eléctricos.

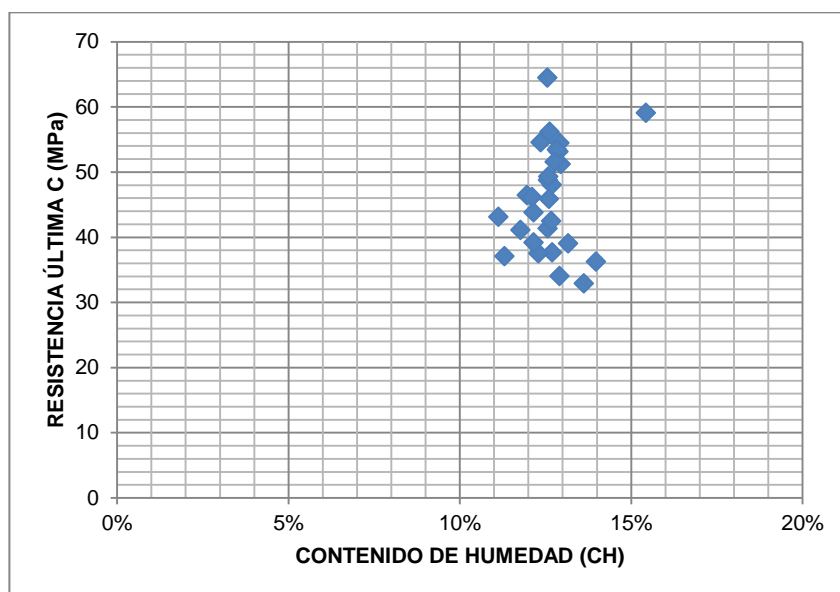


Figura 7.7: Resistencia última ensayo compresión paralela (C) vs contenido de humedad (CH) de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

La agrupación de puntos de esta gráfica permite observar que **no hay una relación directa entre la resistencia a la compresión paralela y su respectivo contenido de humedad**, ya que el área en la gráfica muestra una dispersión de puntos homogénea cerrada, que comprende los rangos de contenido de humedad comprendidos del 11% al 14%, en donde se aprecia que la resistencia no se ve afectada, involucrando los esfuerzos que van desde los 30 a los 60 MPa aproximadamente.

Sin embargo, en la Figura 7.8 se puede apreciar la gráfica de la resistencia última del ensayo a compresión paralela a la fibra (C) vs el contenido de humedad (CH) de las probetas que fueron instrumentadas con deformímetros eléctrico como las que no lo fueron; esta gráfica presenta una agrupación de puntos que indica de manera general una **tendencia inversamente proporcional entre la resistencia a la compresión paralela a la fibra y su respectivo contenido de humedad**, en el rango de ensayo. Sin querer decir esto que sea una característica definitiva del material, ya que por la ausencia de suficientes datos en los otros rangos de contenido de humedad que van entre el 15 y el 80% no es posible concluirlo definitivamente.

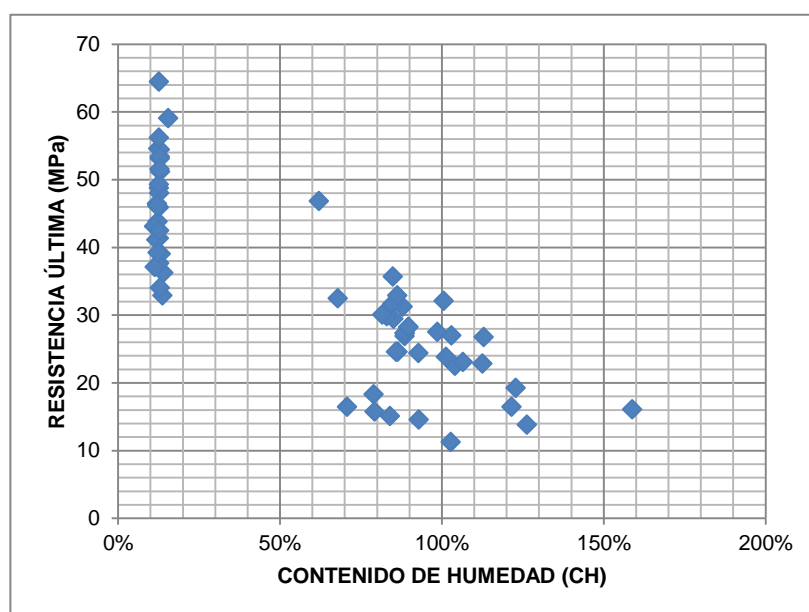


Figura 7.8: Resistencia última ensayo compresión paralela (C) vs contenido de humedad (CH) de las probetas instrumentadas y no-instrumentadas con deformímetro eléctrico.

8. Ensayo de tracción paralela a la fibra (T)

Este Capítulo presenta los resultados obtenidos del ensayo a tracción paralela a las fibras de setenta y cinco (75) probetas extraídas de las secciones longitudinales tomadas de culmos del bambú *Guadua angustifolia* Kunth provenientes de cuatro municipios del departamento de Tolima. A partir de estos ensayos se determinaron y analizaron tres datos fundamentalmente; su esfuerzo último (σ_{ultT}), esfuerzo admisible (σ_{admT}) y módulo de elasticidad longitudinal (E_T) de este material. La Tabla 8.1 indica la distribución de las probetas ensayadas para determinar el esfuerzo último según su municipio de origen y parte del culmo de donde fueron extraídas.

Tabla 8.1: Distribución de las probetas ensayadas a tracción paralela a la fibra para determinar el esfuerzo último.

PARTE DE LA GUADUA	MUNICIPIO LUGAR DE ORIGEN				SUBTOTAL
	JUNÍN (J)	LÍBANO (L)	P/CABILDO (P)	V/HERMOSA (V)	
INFERIOR	4	5	3	3	15
MEDIA	7	7	7	9	30
SUPERIOR	8	7	10	5	30
TOTAL					75

El esfuerzo último a tracción paralela a la fibra se determinó con la ecuación 8.1:

$$\sigma_{ultT} = \frac{F_{ultT}}{A} \quad (8.1)$$

En donde:

σ_{ultT} = esfuerzo último a tracción paralela a la fibra en MPa

F_{ultT} = valor de la carga aplicada en la cual falla la probeta en Kgf

A = área media de la sección transversal de la porción de ensayo en cm^2

Los ensayos a tracción paralela a las fibras se realizaron con la máquina universal de ensayos, ubicada en el laboratorio del instituto de investigaciones tecnológicas (IIT) de Universidad Nacional, con una velocidad de movimiento del cabezal móvil de 0.01 mm/s. Así mismo, las mordazas de la máquina se ajustaron evitando la incursión de otro tipo de esfuerzos, como el de torsión longitudinal, que podría estropear el resultado del ensayo. Siguiendo los lineamientos de la NTC5525 todas las probetas ensayadas tuvieron nudo ubicado en la porción de ensayo cuya medida fue alrededor de los 100 mm. De igual forma, y con el fin de obtener un adecuado comportamiento de las probetas durante el ensayo los extremos de éstas se perfilaron para minimizar la concentración de esfuerzos en el área de transición de espesores e inducir la falla dentro de la porción de ensayo. En la Figura 8.1 se evidencia la falla típica en estos ensayos.



Figura 8.1: Falla típica de las probetas en el ensayo de tracción paralela a la fibra (T).

La Figura 8.2 muestra la curva típica carga vs desplazamiento obtenida en el laboratorio del ensayo de tracción paralela a la fibra, en donde se puede evidenciar de manera general una falla frágil después de haber mantenido un desplazamiento no-lineal en dos intervalos en relación con la carga.

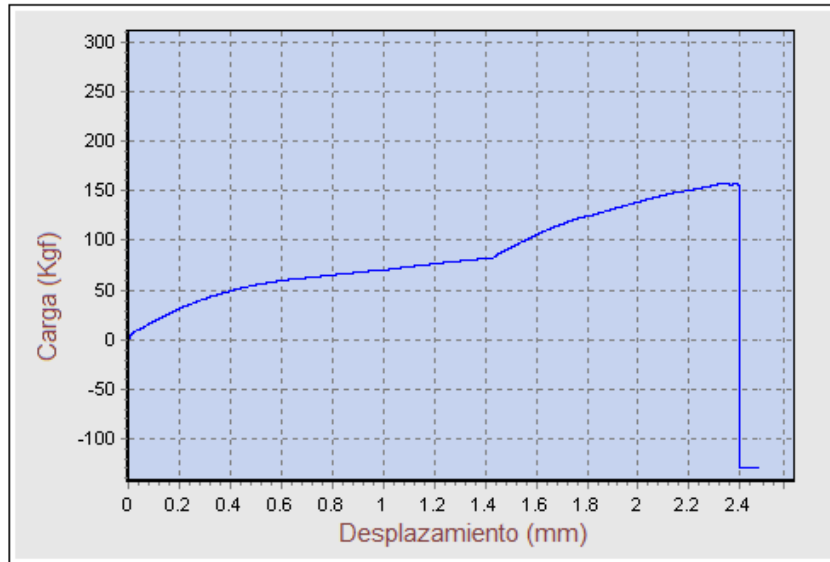


Figura 8.2: Curva carga vs desplazamiento ensayo de tracción paralela a la fibra.

Para determinar el módulo de elasticidad longitudinal (E_T) a tracción paralela a las fibras se instrumentaron treinta y cuatro (34) probetas, y se usó un deformímetro eléctrico por probeta, excepto en tres casos en donde se usaron dos deformímetros. La NTC5525 advierte sobre el uso de mínimo dos deformímetros por probeta, cada uno de ellos en el lado opuesto de ésta, sin embargo, para nuestro caso particular se decidió trabajar con un deformímetro por probeta después de realizar tres preensayos con dos deformímetros y observar la mínima diferencia que existía entre uno y otro. La Tabla 8.2 indica la distribución de las probetas ensayadas para determinar el módulo de elasticidad longitudinal (E_T) según su municipio de origen y parte del culmo de donde fueron extraídas.

Tabla 8.2: Distribución de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico para determinar el módulo de elasticidad longitudinal a tracción paralela a la fibra (E_T).

PARTE DE LA GUADUA	MUNICIPIO LUGAR DE ORIGEN				SUBTOTAL
	JUNÍN (J)	LIBANO (L)	P/CABILDO (P)	V/HERMOSA (V)	
INFERIOR	4	3	3	2	12
MEDIA	3	2	2	3	10
SUPERIOR	4	2	4	2	12
TOTAL					34

Las treinta y cuatro (34) probetas usadas para determinar el módulo de elasticidad longitudinal (E_T) a tracción paralela a las fibras se instrumentaron con deformímetros eléctricos y su lectura de la deformación fue a través de un adquisidor de datos marca KYOWA, la instrumentación se realizó observando la perpendicularidad entre los ejes tanto del deformímetro como de la probeta, y que las caras de cada probeta no presentaran en su superficie deformaciones o poros que impidieran el adecuado pegue del deformímetro a ésta, en la Figura 8.3 se evidencia registro de dicho proceso.

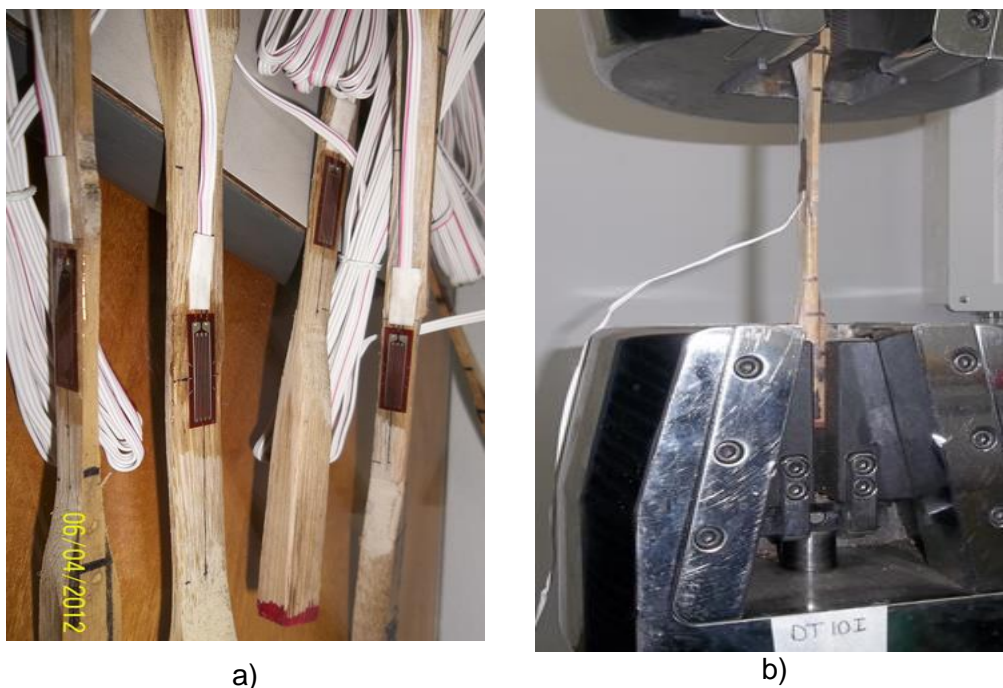


Figura 8.3: a) Probetas instrumentadas para determinar el módulo de elasticidad longitudinal a tracción paralela a la fibra (E_T). b) Probeta dispuesta en la máquina universal.

El módulo de elasticidad longitudinal (E_T) se calculó a partir de la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, y el rango de esta relación fue entre el 10 % y el 60 % de la carga última (F_{ultT}) según lo determina la NTC5525. El valor del módulo de elasticidad longitudinal (E_T) corresponde al valor de las pendientes obtenidas a partir de las gráficas esfuerzo vs deformación. En la Figura 8.4 se da un ejemplo de dichas gráficas.

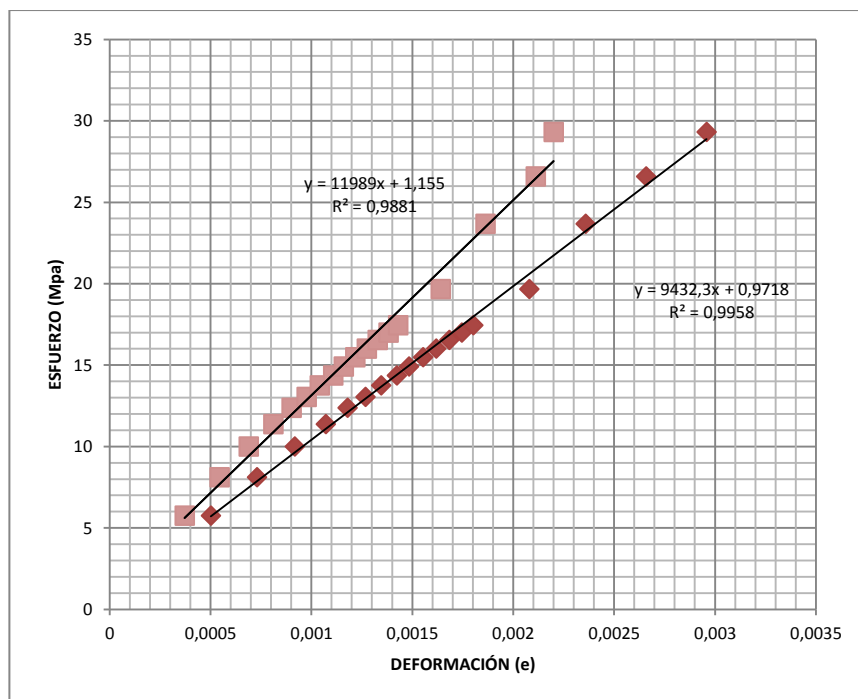


Figura 8.4: Diagrama esfuerzo vs deformación longitudinal de probetas ensayadas a tracción paralela a la fibra (T) para determinar el módulo de elasticidad longitudinal (E_T).

La Tabla 8.3 presenta los resultados de laboratorio obtenidos de esfuerzo último (σ_{ultT}), módulo de elasticidad longitudinal (E_{promT}), y contenido de humedad (CH) de las probetas ensayadas a tracción paralela a la fibra (T).

Algunos de los resultados numéricos obtenidos después del ensayo a tracción paralela a la fibra fueron descartados del proceso de análisis, esto debido principalmente a que la falla de la probeta ocurrió fuera de la porción de ensayo, como lo determina NTC5525. De igual manera se realizó un filtro a los resultados restantes, logrando una exclusión de datos atípicos a partir del criterio de Chauvenet.

Los formatos que contienen los diámetros, espesores, carga última, deformación y demás información consignada durante el ensayo de cada probeta se encuentran en el ANEXO 2: DVD CARPETAS 1, 2, 3 y 4.

La Tabla 8.3 presenta los resultados obtenidos de resistencia última (σ_{ultT}) y contenido de humedad (CH) de las probetas ensayadas no-instrumentadas.

Tabla 8.3: Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a tracción paralela de las probetas no-instrumentadas.

PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA								
INFERIOR			MEDIA			SUPERIOR		
PROBETA	σ_{ultT} (MPa)	CH (%)	PROBETA	σ_{ultT} (MPa)	CH (%)	PROBETA	σ_{ultT} (MPa)	CH (%)
DT02I	49.36	65.66%	DT01M	51.11	19.72%	DT02S	64.67	72.35%
DT08I	47.41	49.66%	DT03M	59.92	25.16%	DT03S	80.00	39.02%
DT12I	53.3	93.66%	DT04M	83.06	53.46%	DT04S	67.28	16.77%
			DT11M	51.21	57.66%	DT06S	53.20	23.08%
			DT13M	51.90	102.68%	DT08S	49.29	83.36%
			DT15M	55.74	68.17%	DT10S	32.89	21.77%
			DT16M	30.80	63.06%	DT12S	39.38	36.63%
			DT17M	62.46	20.40%	DT13S	35.49	19.52%
			DT19M	55.35	42.33%	DT16S	68.25	68.77%
			DT20M	77.19	14.26%	DT19S	65.99	12.71%
			DT21M	65.58	50.70%	DT21S	35.86	19.06%
			DT22M	39.95	88.52%	DT22S	99.98	77.15%
			DT25M	38.74	55.56%	DT23S	38.37	51.58%
			DT26M	56.23	37.36%	DT24S	65.63	76.06%
			DT28M	56.15	124.01%	DT25S	77.39	48.23%
			DT29M	62.20	19.63%	DT27S	47.70	72.21%
						DT30S	67.98	77.23%

La Tabla 8.4 presenta los resultados obtenidos de resistencia última (σ_{ultT}), módulo de elasticidad longitudinal (E_{promT}), y contenido de humedad (CH) de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

Tabla 8.4: Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a tracción paralela de las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA											
INFERIOR				MEDIA				SUPERIOR			
PROBETA	σ_{ultT} (MPa)	E_{promT} (MPa)	CH (%)	PROBETA	σ_{ultT} (MPa)	E_{promT} (MPa)	CH (%)	PROBETA	σ_{ultT} (MPa)	E_{promT} (MPa)	CH (%)
DT01I	69.78	15047.47	13.13%	DT05M	88.40	13190.25	16.75%	DT07S	78.47	20572.1	14.60%
DT03I	53.50	10596.27	13.15%	DT08M	43.22	12033.65	13.36%	DT07S	78.47	20572.21	14.60%
DT04I	62.66	17751.76	12.21%	DT09M	64.10	18220.68	14.00%	DT11S	69.99	16700.71	15.28%
DT05I	38.27	14230.19	12.98%	DT14M	77.08	17024.01	13.94%	DT17S	52.86	15857.39	13.76%
DT06I	87.44	21378.81	16.28%	DT27M	88.23	13420.22	12.76%	DT20S	99.84	17983.74	12.79%
DT07I	39.62	13587.29	14.63%	DT30M	60.87	16330.10	12.78%	DT26S	50.00	12062.18	13.98%
DT09I	94.35	14369.34	20.25%								
DT10I	35.21	9937.66	13.22%								
DT11I	77.18	13580.99	13.42%								
DT13I	47.24	12682.87	12.91%								

8.1 Resultados y análisis de datos (T)

En la parte estadística se realizó el respectivo análisis de los datos obtenidos experimentalmente del esfuerzo último (σ_{ultT}) del ensayo a tracción paralela a la fibra para cada sección de la guadua del departamento de Tolima. Como ya se había indicado anteriormente en el Capítulo 5 “Ensayo de contenido de humedad CH”, en la presente investigación se trabajó con dos grupos de probetas en el ensayo de tracción paralela, por un lado las que fueron instrumentadas con deformímetros eléctricos para determinar el módulo de elasticidad longitudinal del material y de paso su resistencia última, que presentaron un valor promedio de CH=14.13%. Y por otro lado las probetas que no fueron instrumentadas con deformímetro eléctrico; usadas para determinar sólo la resistencia última, que presentaron un valor promedio de CH=51.87%, como se podrá observar más adelante en este documento.

Para aclarar mejor el concepto, la Tabla 8.5 presenta el análisis estadístico de resistencia última a tracción paralela a la fibra para las probetas no-instrumentadas con deformímetro eléctrico, el valor característico se calculó usando la ecuación 4.1, señalada en el Capítulo 4 de este trabajo, tomada de la norma internacional ISO22156 “Bamboo Structural Design” Numeral 7.2.1, la cual es la misma ecuación (G.12.7–1) que usa la NSR-10.

Tabla 8.5: Análisis estadístico del esfuerzo último a tracción paralela a la fibra (T) de probetas no-instrumentadas con deformímetro eléctrico.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA			TOTAL ZONA
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	
NÚMERO DE DATOS (N)	3	16	17	36
PROMEDIO (MPa)	50.02	56.10	58.20	56.58
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	3.00	13.22	18.78	15.55
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	6.00	23.57	32.27	27.48
PERCENTIL 5 (MPa)	47.61	36.76	34.97	34.84
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	43.15	30.91	27.57	30.53

En esta tabla se observa que el valor promedio varía considerablemente a lo largo de la longitud de la guadua, particularmente entre la parte inferior y media, incrementando la

resistencia hacia su parte superior, sin embargo, se observa que en los valores característicos existe una diferencia inversa, en el sentido de que la resistencia disminuye en la medida que la guadua incrementa en altura; esto se debe básicamente a la diferencia del número de muestras en cada parte del culmo de la guadua, y en que sus valores individuales de resistencia última son más dispersos en cada grupo de estas muestras, por lo que el valor de desviación estándar se ve afectado, provocando esta tendencia inversa de valores, evidente en el coeficiente de variación. Ello indica que la tendencia imperante en este ensayo es la del promedio y no la del valor característico.

La Tabla 8.6 presenta el análisis estadístico de resistencia última a tracción paralela a la fibra para las probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico, el valor característico se calculó usando la ecuación 4.1, señalada en el Capítulo 4 de este trabajo, tomada de la norma internacional ISO22156 “Bamboo Structural Design” Numeral 7.2.1, la cual es la misma ecuación (G.12.7–1) que usa la NSR-10.

Tabla 8.6: Análisis estadístico del esfuerzo último a tracción paralela a la fibra (T) de probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA			TOTAL ZONA
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	
NÚMERO DE DATOS (N)	10	6	6	22
PROMEDIO (MPa)	60.53	70.32	71.61	66.22
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	21.17	17.64	18.51	19.40
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	34.98	25.09	25.84	29.29
PERCENTIL 5 (MPa)	36.59	47.63	50.72	38.34
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	25.65	34.46	36.27	31.89

En esta tabla se observa que el valor promedio varía considerablemente a lo largo de la longitud de la guadua, particularmente entre la parte inferior y media, incrementando la resistencia hacia su parte superior. Lo mismo se observa en los valores característicos; aumentan en la medida que la guadua incrementa en altura, esto se debe básicamente a que, aunque no existe homogeneidad en el valor de resistencia última individual de cada ensayo, el valor de desviación estándar no presenta gran diferencia en cada grupo,

provocando esta similitud de tendencias. Ello indica que la tendencia imperante en este ensayo es la del promedio al igual que la del valor característico.

Una vez determinado el valor característico, se determinó el valor del esfuerzo admisible para el ensayo de tracción paralela a la fibra (T) aplicando la ecuación 8.2, señalada completa para todos los ensayos en el Capítulo 4 de este trabajo, tomada de la NSR-10 G.12.7-2, y la Tabla G.12.7-3 “factores de reducción” en relación con cada tipo de esfuerzo.

$$F_T = \frac{FC}{(F_s)(FDC)} (f_{kT}) \quad (8.2)$$

En donde:

- F_T = esfuerzo admisible en la sollicitación del ensayo a tracción paralela a la fibra
- F_{kT} = valor característico del esfuerzo en la sollicitación del ensayo a tracción paralela a la fibra
- FC = factor de reducción por diferencias entre las condiciones de los ensayos en el laboratorio y las condiciones reales de aplicación de las cargas en la estructura:
- 0.5 para el ensayo a tracción paralela
- F_s = factor de Seguridad:
- 2.0 para el ensayo a tracción paralela
- FDC = factor de duración de carga:
- 1.5 para el ensayo a tracción paralela
- T = subíndice para tracción paralela a las fibra

La Tabla 8.7 muestra el valor del esfuerzo admisible para el ensayo de tracción paralela a la fibra (F_T), con probetas instrumentadas y no-instrumentadas, determinado a través de la ecuación 8.2.

Tabla 8.7: Determinación del esfuerzo admisible a tracción paralela a la fibra (T) para probetas instrumentadas y no-instrumentadas, por la ecuación 8.2.

ESFUERZO ADMISIBLE (MPa)	PARTE DE LA GUADUA				CH %
	INFERIOR	MEDIA	SUPERIOR	TOTAL	
F_T	7.19	5.15	4.60	5.09	51.87
F_T^*	4.28	5.74	6.05	5.31	14.13

* Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

La Tabla 8.8 muestra comparativamente los resultados obtenidos del valor característico (f_{kT}) y el esfuerzo admisible a tracción paralela a la fibra (F_T) para diferentes departamentos de Colombia y los encontrados en la NSR-10; determinados todos ellos a través de la ecuación 8.2. Allí se evidencia que Tolima posee un menor valor de esfuerzo admisible, tanto en las probetas instrumentadas como en las no-instrumentadas con deformímetro eléctrico, esto en comparación con el valor encontrado en la NSR-10, y con los valores determinados para los departamentos de Quindío, Cundinamarca y Valle del Cauca en el Proyecto MADRC.

Tabla 8.8: Resultados obtenidos del esfuerzo admisible a tracción paralela a la fibra para diferentes departamentos de Colombia determinados a través de la ecuación 8.2.

AÑO	AUTOR	ORIGEN	NÚMERO ENSAYOS	f_{kT} MPa	F_T MPa	CH %
2013	ARDILA	TOLIMA	36	30.53	5.09	51.87
			22**	31.89	5.31	14.13
2010	NSR-10	N/A	> 20	108.00	18.00	12.00
2010	Proyecto MADRC*	QUINDÍO	61	35.95	5.99	85.97
		C/MARCA	49	38.47	6.41	95.75
		V/CAUCA	51	41.41	6.90	96.14

*Los valores señalados correspondientes al Proyecto MADRC fueron modificados de su ecuación original, la 4.3, y recalculados con la ecuación 8.2, con el fin de poder comparar todos los resultados apropiadamente. ** Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

En el Proyecto MADRC se obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de tracción paralela a la fibra de 61.52 MPa y un valor característico de 35.95 MPa, para 61 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Quindío. Igualmente obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de tracción paralela a la fibra de 55.54 MPa y un valor característico de 38.47 MPa, para 49 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Cundinamarca. Así mismo obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de tracción paralela a la fibra de 66.89 MPa y un valor característico de 41.41 MPa, para 51 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento del Valle del Cauca, con un contenido de humedad promedio de los tres departamentos de 92.67 %. Malaver (2007) obtuvo un valor promedio de resistencia a tracción paralela de 146.19 MPa y un valor característico de 107.90 MPa y López & Trujillo (2002) un valor promedio de 53.51 MPa. La Tabla 8.9 muestra el análisis estadístico para determinar el módulo de elasticidad longitudinal a partir de los datos hallados del ensayo de tracción paralela a la fibra.

Tabla 8.9: Análisis estadístico para el módulo de elasticidad a tracción paralela a la fibra.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA			TOTAL ZONA
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	
NÚMERO DE DATOS (N)	10	6	6	22
PROMEDIO (MPa)	14316.27	15036.49	17291.41	15324.09
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	3316.25	2481.96	3217.35	3202.76
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	23.16	16.51	18.61	20.90
PERCENTIL 5 (MPa)	10234.03	12322.80	13010.98	10668.14
VALOR MÍNIMO (MPa)	9937.66	12033.65	12062.18	9937.66

Los resultados muestran en el promedio una tendencia de variación del módulo de elasticidad al ensayo a tracción paralela que se incrementa proporcional a la altura de la guadua. El Proyecto MADRC obtuvo un valor promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de tracción paralela a la fibra de 7534 MPa, y con valor mínimo de 2842 MPa, para 69 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Quindío. Igualmente obtuvo un valor promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de tracción paralela a la fibra de 5668 MPa, y con valor mínimo de 2009 MPa, para 71 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Cundinamarca. Así mismo obtuvo un valor promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de tracción

paralela a la fibra de 6451 MPa, y con valor mínimo de 2489 MPa, para 71 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento del Valle del Cauca. Al igual que en el ensayo de compresión paralela en este ensayo los valores determinados para el módulo de elasticidad longitudinal presentan variaciones considerables en relación con los valores determinados en el Proyecto MADRC. La Tabla 8.10 contiene los datos del análisis estadístico para el contenido de humedad tanto para las probetas instrumentadas como las no-instrumentadas con deformímetro eléctrico, ensayadas a tracción paralela a la fibra, tomada del Capítulo 5 “Ensayo de contenido de humedad” Tabla 5.1 del presente trabajo.

Tabla 8.10: Análisis estadístico para el contenido de humedad para las probetas ensayadas a tracción paralela a la fibra.

DATOS ESTADÍSTICOS	TOTAL ZONA
PROMEDIO (%)	51.87
	14.13*
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	28.29
	1.79*
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	54.55
	12.65*

* Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico

De acuerdo con estos resultados, el contenido de humedad de las probetas no-instrumentadas para el ensayo a tracción paralela a la fibra muestran un promedio de 51.87%; este promedio no es extraño en este tipo de ensayos bajo las condiciones anteriormente señaladas en el Capítulo 5 que habla sobre el contenido de humedad, sin embargo, su coeficiente de variación es relativamente alto 54.55%, aludiendo una dispersión de datos muy distante en relación con su media aritmética; esta diferencia se puede deber principalmente al hecho que hubo tiempos diferentes, es decir, unos más prolongados que otros, desde el momento en que se retiran las probetas en inmersión hasta el momento en que se hace el ensayo, inclusive al momento de introducirlas al horno de secado. Por otro lado el contenido de humedad de las probetas instrumentadas para el ensayo a tracción paralela a la fibra muestran un promedio de 14.13%, y su coeficiente de variación es relativamente bajo 12.65%, aludiendo una dispersión de datos cerrada en relación con su media aritmética. Vale la pena recordar que las probetas instrumentadas con los deformímetros eléctricos no debían presentar humedad o

evidencia de agua superficial ya que el deformímetro es adherido a la pared externa de la probetas con pegamento epóxico el cual en presencia del agua es inútil, por ello se debió sacar del agua estas probetas para que se airearan por dos o tres días antes de instrumentarlas, por lo que su contenido de humedad debió decrecer dramáticamente, y se diferenció del contenido de humedad de aquellas probetas que permanecieron inmersas por dos o tres semanas y que inmediatamente, o que al poco tiempo después fueron ensayadas.

En la Figura 8.5 se puede apreciar la gráfica que compara la resistencia última del ensayo a tracción paralela a la fibra (T) vs el contenido de humedad, de las probetas no-instrumentadas. La agrupación de puntos de esta gráfica permite observar que no existe una tendencia definida, es decir, que **no hay una relación directa entre la resistencia a la tracción paralela a la fibra y su respectivo contenido de humedad**, ya que el área en la gráfica muestra una dispersión de puntos homogénea abierta, que comprende los rangos de contenido de humedad comprendidos del 15% al 80% aproximadamente, en donde se aprecia que la resistencia no se ve muy afectada para esfuerzos que van desde los 30 a los 80 MPa.

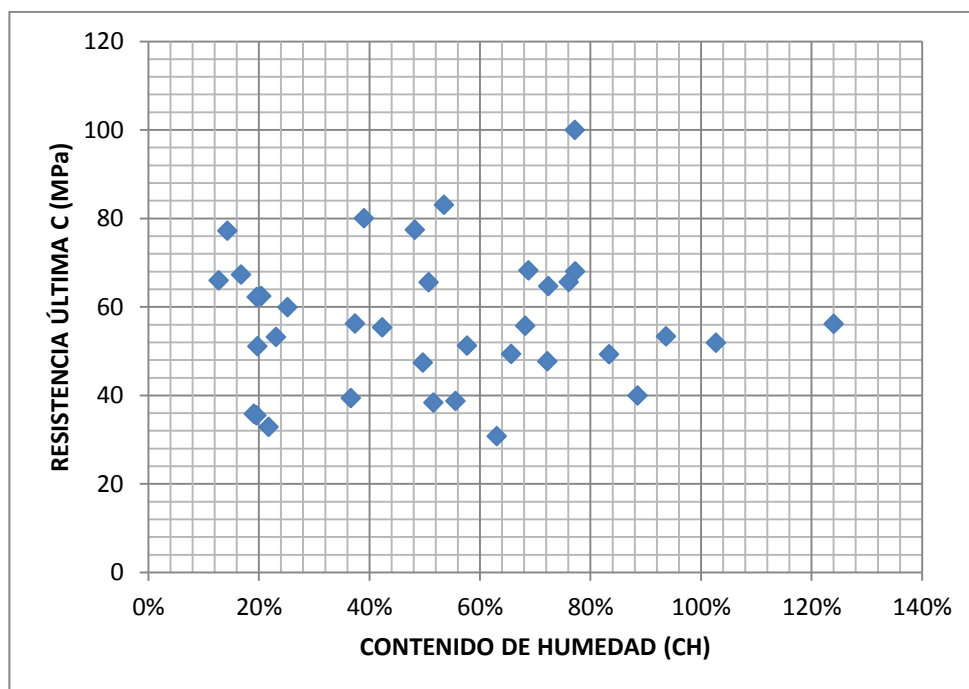


Figura 8.5: Resistencia última ensayo tracción paralela (T) vs contenido de humedad (CH), de la probetas no-instrumentadas.

De igual manera, en la Figura 8.6 se puede apreciar la gráfica que compara la resistencia última del ensayo a tracción paralela a la fibra (T) vs el contenido de humedad, de las probetas instrumentadas con deformímetros eléctricos. La agrupación de puntos de esta gráfica permite observar que no existe una tendencia definida, es decir, que **no hay una relación directa entre la resistencia a la tracción paralela a la fibra y su respectivo contenido de humedad**, ya que el área en la gráfica muestra una dispersión de puntos homogénea cerrada, que comprende los rangos de contenido de humedad comprendidos del 12% al 15% aproximadamente, en donde se aprecia que la resistencia no se ve muy afectada para esfuerzos que van desde los 30 a los 85 MPa.

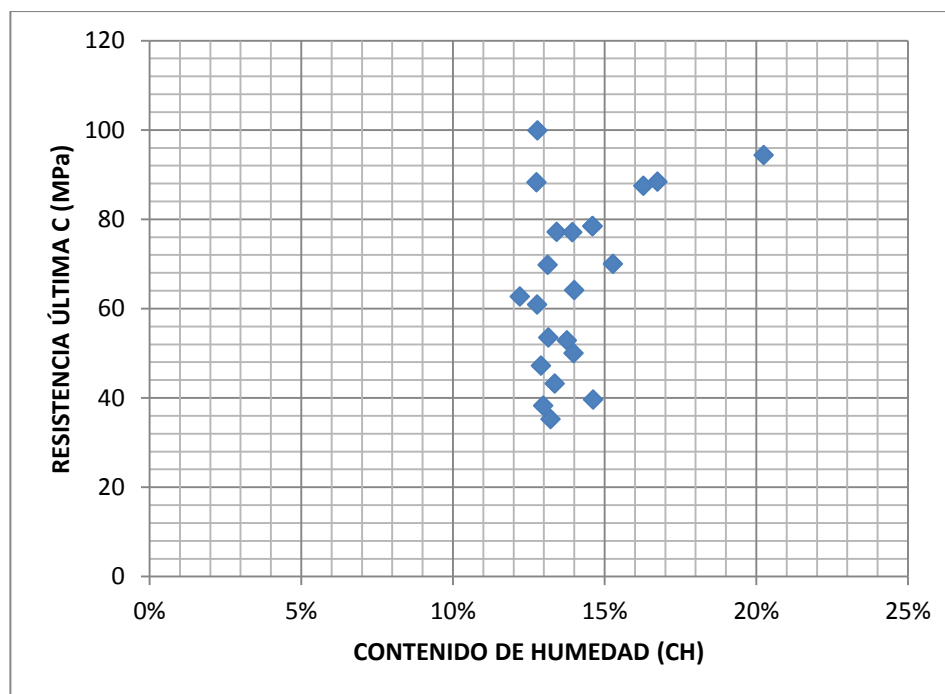


Figura 8.6: Resistencia última ensayo tracción paralela (T) vs contenido de humedad (CH) de las probetas instrumentadas.

Gutiérrez (2011) concluye entre otras cosas que para contenidos de humedad entre el 11% y el 21%, rango en el que el material trabaja normalmente como elemento estructural se presenta una disminución de la resistencia que no sobrepasa el 4%, infiriendo así que en este rango de contenidos de humedad la resistencia a tracción paralela a la fibra es indiferente al cambio en el contenido de humedad.

9. Ensayo de flexión (F)

Para determinar la resistencia última del bambú *Guadua angustifolia* Kunth ante solicitaciones de flexión se ensayaron doce (12) probetas distribuidas de la forma indicada en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1: Distribución de las probetas ensayadas a flexión (F) para determinar su resistencia última y módulo de elasticidad longitudinal.

PARTE DE LA GUADUA	MUNICIPIO LUGAR DE ORIGEN				TOTAL
	JUNÍN (J)	LÍBANO (L)	PALOCABILDO (P)	VILLAHERMOSA (V)	
MEDIA	3	4	3	2	12

En la Figura 9.1 un montaje acondicionado para las probetas (culmos medios) con el fin de determinar el esfuerzo último y módulo de elasticidad en el ensayo de flexión (F), instalado en el Instituto de Extensión e Investigación (IEI) de la Facultad de Ingeniería UN; allí se evidencian cuatro puntos de apoyo cuya distancia es equidistante entre sí y la aplicación de la carga es vertical hacia arriba por medio de un dispositivo hidráulico, que levanta un perfil metálico al que fueron soldadas dos pletinas que aplican la carga en los tercios de la luz libre de la viga simplemente apoyada como lo indica la NTC2555.



a)



b)

Figura 9.1: a) Montaje para culmos de menos de 3.5 m. b) Montaje para culmos de más de 3.5 m.

La Figura 9.2 muestra la falla típica por corte y compresión en el ensayo a flexión.



Figura 9.2: Falla típica en el ensayo a flexión

La Figura 9.3 presenta un ejemplo de las curvas carga v/s deflexión obtenidas en esta investigación.

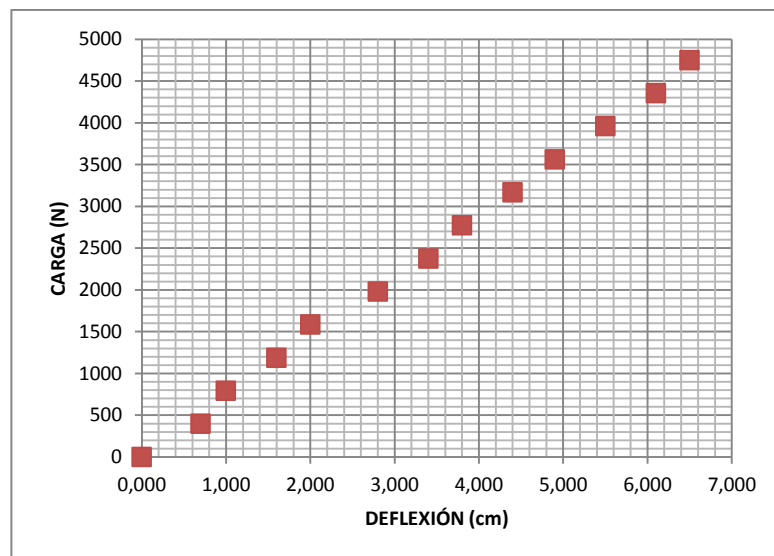


Figura 9.3: Curva carga vs deflexión ensayo de flexión (F).

La resistencia máxima a flexión (σ_{ultF}) se determinó usando la ecuación 9.1 en donde F es la carga de falla de la viga, L es la luz libre, D es el diámetro externo promedio e I_B es el momento de inercia calculado con la ecuación 9.2 donde t es el espesor promedio de la pared de la viga.

$$\sigma_{ultF} = \frac{D}{12} (F \times L \times I_B)$$

(9.1)

$$I_B = \frac{\pi}{64} (D^4 - (D - 2t)^4)$$

(9.2)

En el momento del ensayo las probetas fueron medidas una regla metálica en el centro de la luz para la medición de la deflexión y posterior cálculo del módulo de elasticidad a flexión. El módulo de elasticidad a flexión se determinó usando la ecuación 9.3 en donde F , L e I_B corresponden a los mismos valores explicados en la ecuación 9.1 y δ es la deflexión máxima en el centro de la luz libre de la viga.

$$E = \frac{23 \times F \times L^3}{1296 \times \delta \times I_B}$$

(9.3)

La Tabla 9.2 presenta los resultados obtenidos de resistencia última (σ_{ultF}), módulo de elasticidad longitudinal (E), y contenido de humedad (CH) de las probetas ensayadas para el requerimiento mecánico de flexión. Los formatos que contienen los diámetros, espesores, carga última, deformación y demás información consignada durante el ensayo de cada probeta se encuentran en el ANEXO 2: DVD CARPETAS 1, 2, 3 y 4.

Tabla 9.2: Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a flexión (F).

PARTE MEDIA DE LA GUADUA			
PROBETA	σ_{ultF} (MPa)	E_{promF} (MPa)	CH (%)
DF01M	41.29	15269.56	20.36%
DF02M	46.49	16522.69	18.73%
DF03M	37.83	11439.81	36.67%
DF04M	36.77	15400.95	25.24%
DF05M	38.62	11705.42	15.17%
DF06M	34.88	16175.15	16.61%
DF07M	33.75	15439.59	14.48%
DF08M	34.16	15839.19	31.68%
DF09M	34.03	17571.53	14.25%
DF10M	47.33	15543.15	14.94%
DF11M	44.09	12085.20	15.63%
DF12M	37.28	16206.76	15.13%

9.1 Resultados y análisis de datos (F)

La Tabla 9.3 presenta el análisis estadístico de resistencia última de flexión para la sección de la guadua, el valor característico a flexión mostrado en las Tabla se calculó usando la ecuación 4.1, (señalada en el Capítulo 4 de este trabajo) tomada de la norma internacional ISO22156 “Bamboo Structural Design” Numeral 7.2.1, la cual es la misma ecuación (G.12.7–1) que usa la NSR-10.

Tabla 9.3: Análisis estadístico del esfuerzo último a flexión (F).

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE MEDIA DE LA GUADUA
NÚMERO DE DATOS (N)	12
PROMEDIO (MPa)	38.88
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	4.85
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	12.47
PERCENTIL 5 (MPa)	33.90
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	30.60

Una vez determinado el valor característico, se determinó el esfuerzo admisible para el ensayo de flexión (F) a través de la ecuación 9.4, tomada de la NSR-10 G.12.7-2, y la Tabla G.12.7–3 “factores de reducción” en relación con cada tipo de esfuerzo.

$$F_F = \frac{FC}{(F_s)(FDC)} (f_{kF}) \quad (9.4)$$

En donde:

F_F = esfuerzo admisible en la sollicitación del ensayo a flexión

f_{kF} = valor característico del esfuerzo en la sollicitación del ensayo a flexión

FC = factor de reducción por diferencias entre las condiciones de los ensayos en el laboratorio y las condiciones reales de aplicación de las cargas en la estructura:

- 1.0 para el ensayo a flexión

F_s = factor de Seguridad:

- 2.0 para el ensayo a flexión

FDC = factor de duración de carga:

- 1.5 para el ensayo a flexión

F = subíndice para el ensayo a flexión

La Tabla 9.4 muestra el valor del esfuerzo admisible para el ensayo de flexión (F_F) determinado a través de la ecuación 9.4.

Tabla 9.4: Determinación del esfuerzo admisible a flexión por la ecuación 9.4.

ESFUERZO ADMISIBLE (MPa)	PARTE MEDIA DE LA GUADUA
F_F	10.19

La Tabla 9.5 muestra comparativamente los resultados obtenidos del valor característico (f_{kF}) y el esfuerzo admisible a flexión (F_F) para diferentes departamentos de Colombia y los encontrados en la NSR-10; determinados todos ellos a través de la ecuación 9.4. Aquí se evidencia que Tolima posee un menor valor de esfuerzo admisible, en comparación con el valor encontrado en la NSR-10, y el valor determinado para el departamento del Valle del Cauca, pero presenta un mayor valor que en los departamentos de Quindío y Cundinamarca en el Proyecto MADRC.

Tabla 9.5: Resultados obtenidos del esfuerzo admisible de flexión para los diferentes departamentos de Colombia determinados a través de la ecuación 9.4.

AÑO	AUTOR	ORIGEN	NÚMERO ENSAYOS	f_{kF} MPa	F_F MPa	CH%
2013	ARDILA	TOLIMA	12	30.60	10.19	19.91
2010	NSR-10	N/A	> 20	45.05	15.00	12.00
2010	Proyecto MADRC*	QUINDÍO	61	40.95	13.64	73.25
		C/MARCA	12	26.00	8.66	72.27
		V/CAUCA	11	22.19	7.40	55.60

*Los valores señalados correspondientes al Proyecto MADRC fueron modificados de su ecuación original, la 4.3, y recalculados con la ecuación 9.4, con el fin de poder comparar todos los resultados apropiadamente.

En el Proyecto MADRC se obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de flexión de 68.98 MPa y un valor característico de 40.95 MPa, para 61 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Quindío. Igualmente obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de flexión de 65.00 MPa y un valor característico de 26.00 MPa, para 12 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Cundinamarca.

Así mismo obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de flexión de 68.82 MPa y un valor característico de 22.19 MPa, para 11 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento del Valle del Cauca, con un contenido de humedad promedio de los tres departamentos de 71.04%. La Tabla 9.6 presenta el análisis estadístico para el módulo de elasticidad a flexión para las probetas ensayadas.

Tabla 9.6: Análisis estadístico para el módulo de elasticidad longitudinal a flexión.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE MEDIA DE LA GUADUA
NÚMERO DE DATOS (N)	12
PROMEDIO (MPa)	14933.25
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	2026.33
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	13.57
PERCENTIL 5 (MPa)	11585.89
VALOR MÍNIMO (MPa)	11439.81

El Proyecto MADRC obtuvo un valor promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de flexión de 13564 MPa, y con un valor mínimo de 7452 MPa, para 62 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Quindío. Igualmente obtuvo un valor promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de flexión de 14511 MPa, y con un valor mínimo de 10539 MPa, para 12 probetas extraídas de guaduas de Cundinamarca. Así mismo obtuvo un valor promedio para el módulo de elasticidad al esfuerzo de flexión de 15052 MPa, y con un valor mínimo de 2996 MPa, para 12 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento del Valle del Cauca. En este ensayo los valores determinados para el módulo de elasticidad longitudinal presentan variaciones considerables en relación con los valores determinados en el Proyecto MADRC; esto se puede deber a que en este trabajo el tiempo que estuvieron los culmos sumergidos en agua fue inferior por lo que su contenido de humedad estuvo muy por debajo al del proyecto de la referencia.

La Tabla 9.7 da a conocer el contenido de humedad determinado para las muestras extraídas de los ensayos a flexión, tomada del Capítulo 5 “Ensayo de contenido de humedad” Tabla 5.1 del presente trabajo; se determina un promedio de 19.91%, lo que indica que su tiempo de exposición al agua fue el menor de todos los ensayos, así mismo su coeficiente de variación es de valor medio 37.42%, mostrando una correlación con su media aritmética homogénea en términos generales.

Tabla 9.7: Análisis estadístico del contenido de humedad para las probetas ensayadas a flexión.

DATOS ESTADÍSTICOS	TOTAL ZONA
PROMEDIO (%)	19.91
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	7.45
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	37.42

En la Figura 9.4 se puede apreciar la gráfica de la resistencia del ensayo de flexión (F) vs el contenido de humedad. Esta gráfica comprende una distribución de puntos que no permite observar de manera clara una relación entre la resistencia a la flexión y su respectivo contenido de humedad, ya que el área de la gráfica muestra una dispersión de puntos muy pequeña, por lo que **no se determinó si existe o no alguna tendencia**.

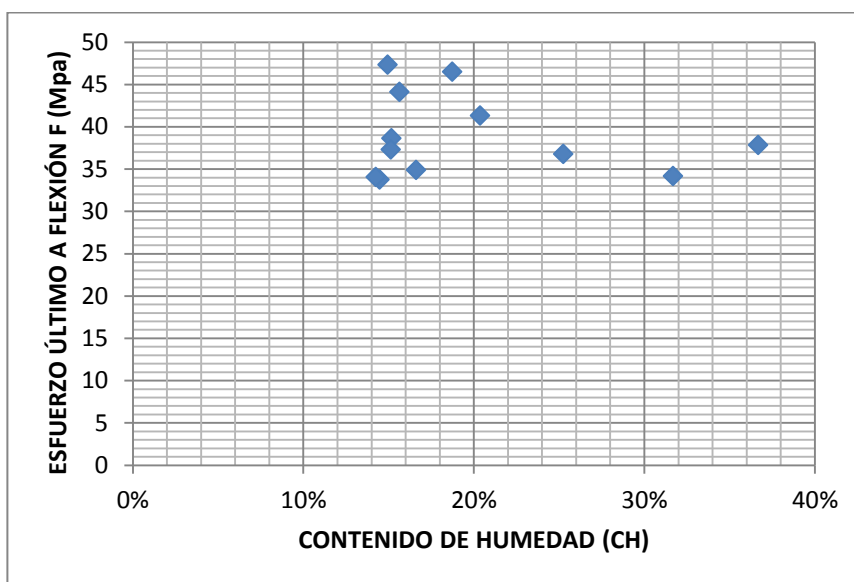


Figura 9.4: Resistencia ensayo a flexión (F) vs contenido de humedad (CH).

Esta distribución aunque da una idea del comportamiento del material ante este tipo de sollicitación mecánica, frente a una acotada diferencia entre contenidos de humedad, no se podría tomar como una tendencia definitiva, ya que por un lado el número de muestras es limitado (12), en segundo lugar, el rango de contenidos de humedad es pequeño, aunque se encuentra en rango de diseño. Para llegar a una conclusión más especializada hacen falta trabajos en donde no sólo se considere el contenido de humedad sino los tipos de falla para definir con mayor certeza el comportamiento de este material ante este requerimiento mecánico.

10. Ensayo de compresión perpendicular (Cp)

Para determinar la resistencia última de compresión perpendicular a la fibra (Cp) del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima se ensayaron 74 probetas distribuidas de la forma indicada en la Tabla 10.1. Este ensayo debido a que no se encuentra contemplado en la norma nacional y ninguna internacional, para su ejecución se siguieron los procedimientos utilizados en investigaciones ya realizadas, como en el Proyecto MADRC, o Lamus (2008).

Se ensayaron probetas de la parte inferior, media y superior de los culmos de Guadua, con una longitud de 17 cm sin nudo y sin relleno de mortero. La Tabla 10.1 presenta la distribución de las probetas usadas en este ensayo.

Tabla 10.1: Distribución de las probetas ensayadas a compresión perpendicular a la fibra para determinar el esfuerzo último.

PARTE DE LA GUADUA	MUNICIPIO LUGAR DE ORIGEN				SUBTOTAL
	JUNÍN (J)	LÍBANO (L)	PALOCABILDO (P)	VILLAHERMOSA (V)	
INFERIOR	5	3	2	5	15
MEDIA	7	7	7	8	29
SUPERIOR	8	7	10	5	30
TOTAL					74

El esfuerzo último a compresión perpendicular a la fibra (σ_{ultCp}) se determinó usando la ecuación 10.1 en donde D_e es el diámetro externo promedio de la probeta, F es la carga de falla, L es la longitud promedio y t el espesor de pared promedio.

$$\sigma_{ultCp} = \frac{3 \times D_e \times F}{2 \times L \times t^2} \quad (10.1)$$

La Figura 10.1 muestra un esquema general del ensayo de compresión perpendicular.

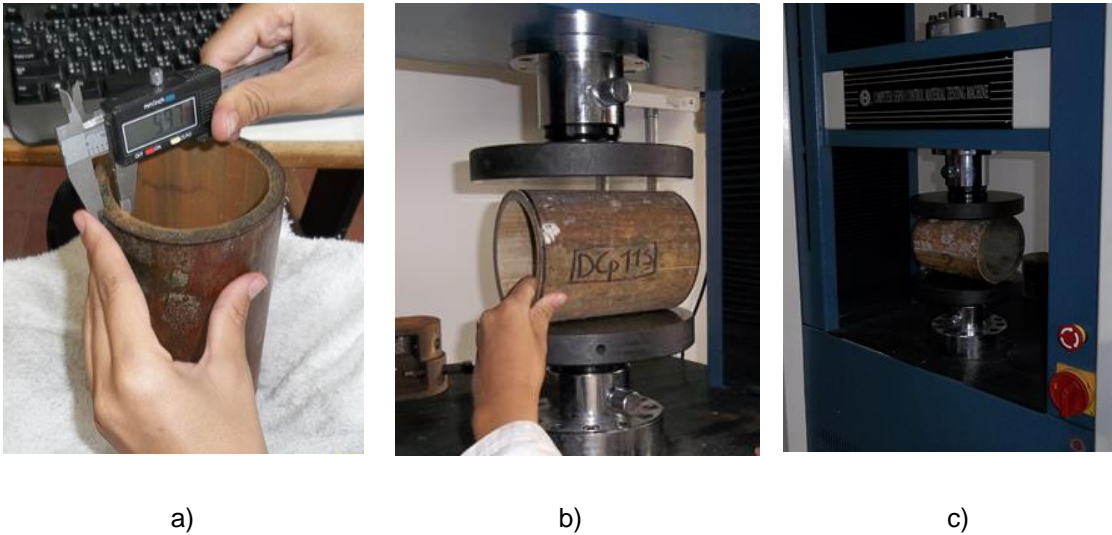


Figura 10.1: a) Medición de espesores. b) Posicionamiento de la probeta en la máquina de ensayos. c) Desarrollo de la sollicitación mecánica.

La Figura 10.2 muestra la curva típica carga vs desplazamiento obtenida en el laboratorio del ensayo de compresión perpendicular a la fibra, en donde se puede evidenciar de manera general una falla frágil después de haber mantenido un desplazamiento lineal en un solo intervalo en relación con la carga.

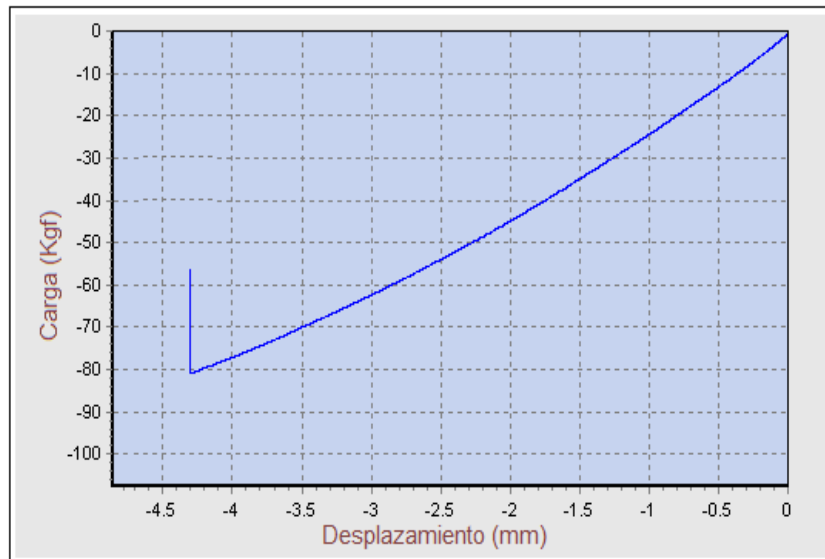


Figura 10.2: Curva carga vs desplazamiento ensayo de compresión perpendicular

La Figura 10.3 muestra el tipo de falla típica en este ensayo.

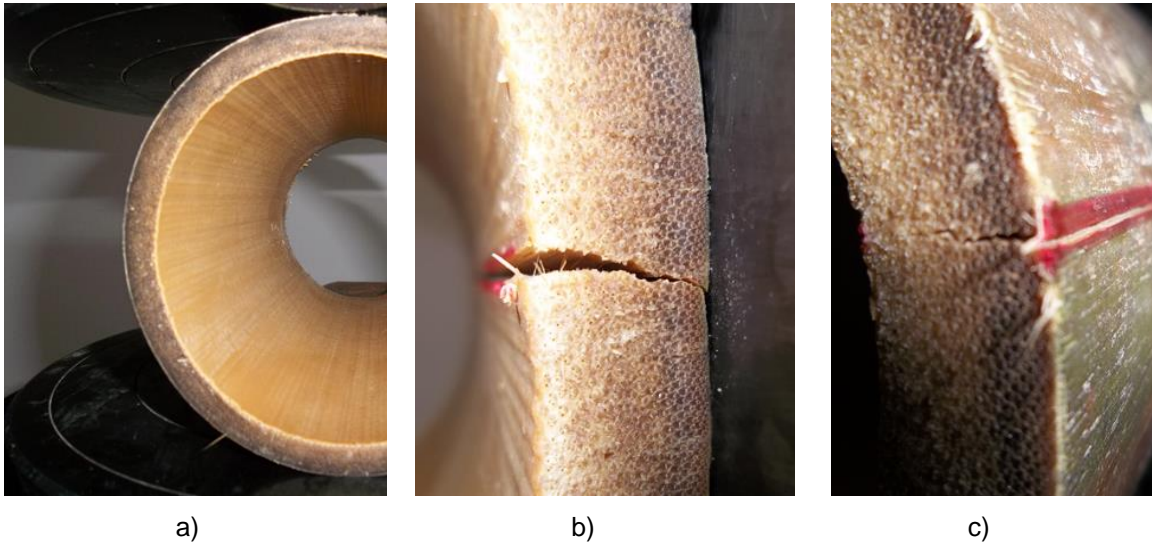


Figura 10.3: Falla típica en el ensayo de compresión perpendicular a la fibra (C_p): a) cuando sucede la falla. b) falla desde el interior de la probeta. C) falla desde el exterior de la probeta.

La Tabla 10.2 presenta los resultados obtenidos de resistencia última a compresión perpendicular a la fibra (σ_{ultCp}), y contenido de humedad (CH) de las probetas ensayadas. Algunos de los resultados numéricos obtenidos después del ensayo de compresión perpendicular a la fibra fueron descartados del proceso de análisis, esto debido principalmente a que la falla de la probeta ocurrió fuera de la porción de ensayo, como lo determina NTC5525. De igual manera se realizó un filtro a los resultados restantes, logrando una exclusión de datos atípicos a partir del criterio de Chauvenet.

Los formatos que contienen los diámetros, espesores, carga última, deformación y demás información consignada durante el ensayo de cada probeta se encuentran en el ANEXO 2: DVD CARPETAS 1, 2, 3 y 4.

Tabla 10.2: Resultados de laboratorio obtenidos después del ensayo a compresión perpendicular a la fibra (Cp).

PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA								
INFERIOR			MEDIA			SUPERIOR		
PROBETA	σ_{ultCp} (MPa)	CH (%)	PROBETA	σ_{ultCp} (MPa)	CH (%)	PROBETA	σ_{ultCp} (MPa)	CH (%)
DCp01I	2.66	76.51%	DCp01M	4.64	83.09%	DCp01S	4.41	104.75%
DCp03I	4.13	76.78%	DCp02M	3.74	63.68%	DCp02S	4.05	59.76%
DCp04I	2.56	99.78%	DCp03M	3.25	98.81%	DCp03S	4.00	116.51%
DCp05I	4.60	81.34%	DCp04M	4.30	59.58%	DCp04S	4.86	71.82%
DCp06I	6.90	74.57%	DCp05M	4.53	57.43%	DCp05S	5.95	76.90%
DCp07I	6.30	87.04%	DCp07M	2.49	62.66%	DCp06S	3.07	80.60%
DCp08I	4.12	109.33%	DCp08M	2.41	72.86%	DCp07S	5.61	89.35%
DCp09I	4.57	78.99%	DCp09M	5.10	91.10%	DCp08S	4.67	100.05%
DCp10I	4.83	69.44%	DCp10M	2.82	86.81%	DCp09S	3.94	89.52%
DCp11I	6.19	105.61%	DCp11M	6.11	64.09%	DCp10S	4.88	80.10%
DCp12I	4.86	95.28%	DCp12M	2.67	116.23%	DCp11S	5.73	57.34%
DCp13I	4.03	90.48%	DCp13M	4.76	72.25%	DCp12S	5.15	122.17%
DCp14I	5.00	78.34%	DCp14M	3.99	110.94%	DCp13S	6.36	76.31%
DCp15I	6.47	75.03%	DCp15M	6.14	65.70%	DCp14S	4.24	73.29%
			DCp16M	3.79	106.13%	DCp15S	3.64	77.18%
			DCp17M	3.40	88.50%	DCp16S	5.83	81.12%
			DCp18M	4.17	83.42%	DCp17S	4.40	89.04%
			DCp20M	5.10	60.34%	DCp18S	3.74	113.14%
			DCp21M	4.38	77.24%	DCp21S	5.17	92.08%
			DCp22M	4.11	116.14%	DCp22S	4.22	79.34%
			DCp23M	3.69	77.54%	DCp23S	2.63	89.40%
			DCp24M	4.71	65.08%	DCp24S	4.68	65.46%
			DCp25M	3.16	101.36%	DCp25S	4.01	96.71%
			DCp26M	3.51	79.85%	DCp26S	2.47	72.96%
			DCp27M	3.65	93.50%	DCp27S	5.28	57.20%
			DCp28M	3.55	121.14%	DCp28S	6.83	83.42%
			DCp29M	5.37	73.50%	DCp29S	3.60	108.81%
			DCp30M	4.84	62.45%			

10.1 Resultados y análisis de datos (Cp)

La Tabla 10.3 presenta el análisis estadístico de resistencia última de compresión perpendicular a la fibra para las probetas ensayadas, el valor característico mostrado en la tabla se calculó usando la ecuación 4.1, tomada de la norma internacional ISO22156 “Bamboo Structural Design” Numeral 7.2.1, o ecuación (G.12.7–1) en la NSR-10.

Tabla 10.3: Análisis estadístico del esfuerzo último a compresión perpendicular a la fibra.

DATOS ESTADÍSTICOS	PARTE DEL CULMO DE LA GUADUA			TOTAL ZONA
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	
NÚMERO DE DATOS (N)	14	28	27	69
PROMEDIO (MPa)	4.80	4.08	4.57	4.42
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	1.32	0.99	1.08	1.12
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	27.50	24.12	23.58	25.27
PERCENTIL 5 (MPa)	2.63	2.45	2.53	2.53
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	2.11	2.15	2.22	2.32

Los resultados obtenidos muestran que no existe una gran variación de resistencia a la compresión perpendicular para cada porción de la guadua, por lo que se infiere que la distribución y concentración de las fibras en el sentido longitudinal no afecta la resistencia a la compresión perpendicular. Una vez determinado el valor característico, se calculó el esfuerzo admisible a través de la ecuación 10.2, tomada de la NSR-10 G.12.7-2.

$$F_{Cp} = \frac{FC}{(F_s)(FDC)} (f_{kCp}) \quad (10.2)$$

F_{Cp} = esfuerzo admisible en la sollicitación compresión perpendicular

f_{kCp} = valor característico del esfuerzo en la sollicitación compresión perpendicular

FC = factor de reducción por diferencias entre las condiciones de los ensayos en el laboratorio y las condiciones reales de aplicación de las cargas en la estructura:

- 1.0 para el ensayo a compresión perpendicular a la fibra

F_s = factor de Seguridad:

- 1.8 para el ensayo a compresión perpendicular a la fibra

FDC = factor de duración de carga:

- 1.2 Para el ensayo a compresión perpendicular a la fibra

Cp = subíndice para compresión perpendicular a las fibra

La Tabla 10.4 muestra el valor del esfuerzo admisible para el ensayo de compresión perpendicular a la fibra (F_{Cp}) determinado a través de la ecuación 10.2.

Tabla 10.4: Determinación del esfuerzo admisible a compresión perpendicular a la fibra.

ESFUERZO ADMISIBLE (MPa)	PARTE DE LA GUADUA			
	INFERIOR	MEDIA	SUPERIOR	TOTAL
F_{Cp}	0.98	1.00	1.03	1.07

La Tabla 10.5 muestra comparativamente los resultados obtenidos del valor característico (f_{kCp}) y el esfuerzo admisible a compresión perpendicular a la fibra (F_{Cp}) para diferentes departamentos de Colombia y los encontrados en la NSR-10; determinados todos ellos a través de la ecuación 10.2. Allí se evidencia que Tolima posee un menor valor de esfuerzo admisible, en comparación con el valor encontrado en la NSR-10, y con el valor determinado para el departamento de Quindío, sin embargo, presenta un valor superior comparado con los valores determinados para los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca en el Proyecto MADRC.

Tabla 10.5: Resultados obtenidos del esfuerzo admisible a compresión perpendicular a la fibra para diferentes departamentos de Colombia determinados a través de la ecuación 10.2.

AÑO	AUTOR	ORIGEN	NÚMERO ENSAYOS	f_{kCp} MPa	F_{Cp} MPa	CH%
2013	ARDILA	TOLIMA	69	2.32	1.07	83.60
2010	NSR-10	N/A	> 20	3.04	1.40	12.00
2010	Proyecto MADRC*	QUINDÍO	47	3.01	1.38	78.58
		C/MARCA	50	1.33	0.61	73.84
		V/CAUCA	53	1.31	0.60	93.86

*Los valores señalados del Proyecto MADRC fueron modificados de su ecuación original, la 4.3, y recalculados con la ecuación 10.2, con el fin de poder comparar todos los resultados apropiadamente.

En el Proyecto MADRC se obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra de 8.35 MPa y un valor característico de 3.01 MPa, para 47 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Quindío.

Igualmente obtuvo un valor promedio de resistencia última al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra de 5.20 MPa y un valor característico de 1.33 MPa, para 50 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento de Cundinamarca. Así mismo obtuvo un valor promedio de resistencia última esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra de 6.35 MPa y un valor característico de 1.31 MPa, para 53 probetas extraídas de guaduas provenientes del departamento del Valle del Cauca, con un contenido de humedad promedio de los tres departamentos de 81.47%.

La Tabla 10.6 muestra los valores del contenido de humedad para las probetas ensayadas a compresión perpendicular a la fibra a partir de su análisis estadístico, tomada del Capítulo 5 “Ensayo de contenido de humedad” Tabla 5.1 del presente trabajo.

Tabla 10.6: Análisis estadístico para el contenido de humedad para las probetas ensayadas a compresión perpendicular (Cp).

DATOS ESTADÍSTICOS	TOTAL ZONA
PROMEDIO (%)	83.60
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	17.01
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	20.34

Por otro lado el contenido de humedad determinado para las muestras extraídas de los ensayos de compresión perpendicular muestran un promedio de 83.60%, lo que indica de manera general que se tuvo en cuenta las probetas con menor contenido de humedad que los ensayos de compresión y tracción paralela, así mismo su coeficiente de variación es relativamente bajo 20.34%, mostrando una correlación con su media aritmética más homogénea, esto debido principalmente a que las probetas antes de su respectivo ensayo permanecieron inmersas en el agua aproximadamente el mismo tiempo, con diferencia de unas pocas horas entre ensayo y ensayo después de haber estado por dos o tres semanas en el agua, dando como resultado datos de contenidos de humedad en un rango más cerrado.

En la Figura 10.4 se puede apreciar la gráfica que compara la resistencia última del ensayo a compresión perpendicular a la fibra (C_p) vs el contenido de humedad.

La agrupación de puntos de esta gráfica permite observar que no existe una tendencia definida, es decir, que **no hay una relación directa entre la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra y su respectivo contenido de humedad**, ya que el área en la gráfica muestra una dispersión de puntos homogénea, que comprende los rangos entre el 55% al 120% de contenido de humedad.

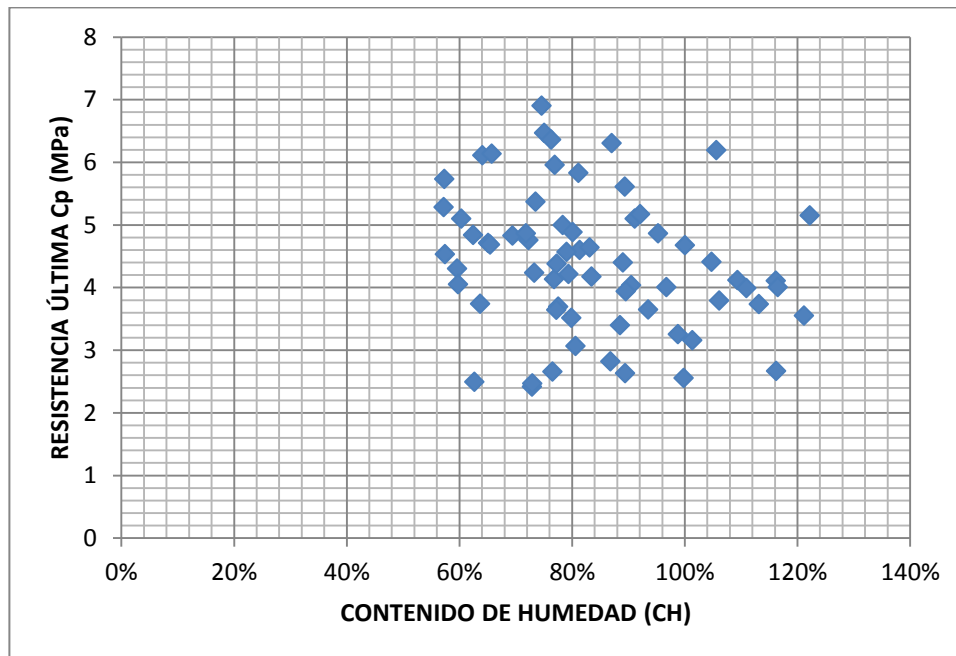


Figura 10.4: Resistencia última ensayo a compresión perpendicular a la fibra (C_p) vs contenido de humedad (CH).

Esta distribución da una idea general del comportamiento del material ante este tipo de sollicitación mecánica frente a diferentes contenidos de humedad en un rango determinado, sin embargo, hacen falta trabajos en donde no sólo se considere este rango alto sino que se definan criterios con contenidos de humedad que estén más acordes con la realidad de un diseño estructural, es decir, entre el 10% y el 20%, para definir con mayor certeza el comportamiento de este material.

11. Conclusiones

El valor admisible determinado para el ensayo de corte paralelo a la fibra en este proyecto es el 61% comparado con el que determina la NSR-10, siendo los valores 0.73 MPa con un CH=101%, y 1.20 MPa con un CH=12%, respectivamente. **El valor admisible determinado para el ensayo de compresión perpendicular a la fibra** es el 76.4% comparado con el que determina la NSR-10, siendo los valores 1.07 MPa con un CH=84%, y 1.40 MPa con un CH=12%, respectivamente. Estas diferencias entre los valores de esfuerzos admisibles del presente trabajo con los determinados en la NSR-10 se podrían asociar con la diferencia entre los contenidos de humedad. A pesar que el valor de la resistencia última no es la única variable para determinar el valor admisible de este material (F_v) y (F_{cp}), se debe considerar que tanto en una sollicitación como en la otra, el contenido de humedad (CH%) de las probetas al momento de los ensayos no mostraron ninguna tendencia o comportamiento específico, ni directa ni inversamente proporcional respecto a la carga última. **Es decir, el hecho de que la guadua contenga un alto o bajo contenido de humedad no afectó el material desde el punto de vista mecánico en este tipo de sollicitaciones.**

En el ensayo a compresión paralela a la fibra hubo dos grupos de probetas, las que fueron instrumentadas con deformímetro eléctrico y las que no lo fueron: el valor admisible determinado para las instrumentadas es un 6% mayor comparado con el que determina la NSR-10, siendo los valores 14.84 MPa con un CH=12.86%, y 14.00 MPa con un CH=12%, respectivamente. El valor admisible determinado para las probetas no-instrumentadas es el 45% comparado con el que determina la NSR-10, siendo los valores 6.29 MPa con un CH=95.27%, y 14.00 MPa con un CH=12%, respectivamente. **Estas diferencias entre los valores de esfuerzos admisibles entre probetas instrumentadas y no-instrumentadas comparados con los determinados en la NSR-10, son consecuencia en gran parte de la diferencia entre los contenidos de humedad.** Entendiendo que el valor de la resistencia última no es la única variable para determinar el valor admisible (FC) de este material, se debe considerar que en el análisis del ensayo a compresión paralela a la fibra se pudo advertir una tendencia inversamente

proporcional del contenido de humedad respecto a la carga última, es decir, **la guadua alcanzó una mayor resistencia entre menor fue su contenido de humedad en este tipo de sollicitación mecánica.**

En el ensayo de tracción paralela a la fibra, al igual que en el ensayo a compresión paralela, hubo dos grupos de probetas, las que fueron instrumentadas con deformímetro eléctrico y las que no lo fueron, así mismo, la diferencia fundamental entre estos dos grupos fue su contenido de humedad (CH%), es decir, las instrumentadas tenían un contenido de humedad muy inferior a las que no lo estaban, sin embargo, a diferencia del ensayo de compresión paralela, en este no hubo una tendencia o comportamiento específico, ni directa ni inversamente proporcional respecto a la carga última. Es decir, **el hecho de que la guadua contenga un alto o bajo contenido de humedad no afecta al material desde el punto de vista mecánico en este tipo de sollicitación.** Así las cosas, el valor admisible determinado para las probetas instrumentadas es el 29.5% comparado con el que determina la NSR-10, siendo los valores 5.31 MPa con un CH=14.13%, y 18.00 MPa con un CH=12%, respectivamente. El valor admisible determinado para las no-instrumentadas es el 28.3% comparado con el que determina la NSR-10, siendo los valores 5.09 MPa con un CH=51.87%, y 18.00 MPa con un CH=12%, respectivamente. **Los valores admisibles determinados para las probetas instrumentadas "bajo contenido de humedad" como no-instrumentadas "alto contenido de humedad" no alcanzan a tener una diferencia del 5%.**

El valor admisible determinado para el ensayo a flexión es el 69% comparado con el que determina la NSR-10, siendo los valores 10.19 MPa con un CH=19.91%, y 15.00 MPa con un CH=12%, respectivamente. Estas diferencias entre los valores de esfuerzos admisibles del presente trabajo con los determinados en la NSR-10, podrían ser consecuencia de la diferencia entre los contenidos de humedad, teniendo en cuenta la respuesta del material frente al contenido de humedad en el ensayo a compresión paralela. Sin embargo, en este trabajo **no se logró determinar una relación directa entre la respuesta mecánica del material frente al contenido de humedad en este tipo de sollicitaciones.**

12. Recomendaciones y comentarios finales

Recomendaciones:

Realizar un trabajo de investigación dirigido a determinar un factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a la compresión paralela a la fibra, y flexión de la *Guadua angustifolia* Kunth; esto con el fin de contar con un criterio más especializado del comportamiento para el diseño de estructuras construidas con este material en Colombia.

Realizar un trabajo de investigación dirigido a determinar los valores de esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth en el resto del territorio nacional; esto con el fin de consolidar datos y complementar en la norma tablas ajustadas para el diseño de estructuras con este material en Colombia.

Se recomienda elaborar, en una futura investigación, la Tabla para *Guadua angustifolia* Kunth para determinar los contenidos de humedad de equilibrio de las ciudades más representativas de Colombia en este tema, homóloga a la de la madera.

Se debe revisar la normativa, ya que la NSR-10 considera como la principal fortaleza de la *Guadua angustifolia* Kunth la resistencia al esfuerzo a tracción paralela a la fibra, por encima casi 1,3 veces del esfuerzo a compresión paralela. Y en este trabajo se considera de manera general como la principal fortaleza de la *Guadua angustifolia* Kunth la resistencia al esfuerzo a compresión paralela a la fibra, por encima más de 3.3 veces del esfuerzo a tracción paralela a la fibra. Es decir, no sólo cambia la jerarquía e importancia del comportamiento de este material en cuanto a sus esfuerzos admisibles, sino que muestra una enorme diferencia entre uno y otro esfuerzo (ver Figura anexo 1.1).

Comentarios finales:

En cuanto a la ejecución de los ensayos mecánicos: para este tipo de investigaciones en general se debe prestar mucha atención a la manipulación del material dentro del laboratorio, en especial para controlar o conservar el contenido de humedad de las probetas unas respecto a las otras, para que no haya una gran diferencia a la hora del ensayo y cambien los resultados drásticamente, sobretodo en el caso que se requiera hacer una comparación entre el contenido de humedad de cada muestra con su respectiva resistencia última. La diferencia drástica de contenido de humedad de las muestras se puede controlar no sacando del tanque de inmersión gran cantidad de probetas, 10 o 15 unidades a la vez para el ensayo, sino tres o cuatro, considerando que unas probetas demoran más en fallar que otras.

Como se mencionó en las conclusiones, en el ensayo a compresión paralela a la fibra hubo dos grupos de probetas, las que fueron instrumentadas y las que no, gracias a esto se pudo advertir una tendencia general del material a alcanzar una mayor resistencia entre menor sea su contenido de humedad, por este motivo ocurrió que las probetas instrumentadas no alcanzaron a ser ensayadas en la máquina universal de ensayos del laboratorio porque sobrepasaban su capacidad de carga (20 toneladas) por lo cual se debieron terminar de ensayar en la máquina análoga VERSA TESTER de capacidad de 30 toneladas ubicada en la carpintería del patio del SINDU. Para el proyecto este cambio no afectó de manera importante el resultado, particularmente en lo que tiene que ver con el valor del módulo de elasticidad longitudinal y coeficiente de Poisson, ya que para su cálculo se tomaron los datos de carga en el rango lineal del material.

En el ensayo de tracción paralela a las fibra ocurrió que las probetas en general, tanto instrumentadas como no-instrumentadas se resbalaban de la mordaza de la máquina universal en el momento del ensayo al alcanzar cierta carga, esto parece evidenciarse en las gráficas carga v/s desplazamiento cuando la curva cambia abruptamente de dirección; el tema trasciende si se tiene en cuenta que este hecho pudo afectar el valor determinado del esfuerzo admisible en este ensayo, ya que presenta una diferencia abrumadora en comparación con el expresado en la NSR-10, no sólo para la guadua del departamento de Tolima sino para los del Proyecto MADRC.

Bibliografía

[1] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, AIS. Capítulo E-7 Casas de uno y dos pisos en bahareque encementado. En: NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE (NSR-98) Colombia: 2002.

[2] ASOCIACION COLOMBIANA DE INGIENERIA SISMICA, AIS. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Título G- Estructuras de madera y estructuras de guadua. Bogotá, Colombia: Marzo de 2010.

[3] GHAVAMI, Khosrow. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. En: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Brasil: V.9, N°.1, p.107-114, 2005.

[4] GUTIÉRREZ G, Mateo. Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* Kunth. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia: 2011. 151p.

[5] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth. Bogotá: ICONTEC, 2007 (NTC5525).

[6] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación del contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos. Bogotá: ICONTEC, 2005 (NTC26-1)

[7] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Bamboo structural design. ISO, 2001 (ISO22156).

- [8] LAMUS B., Fabián A. Calificación de una conexión viga-columna resistente a momento en *Guadua angustifolia*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia: 2008. 242 p.
- [9] MALAVER ZAPATA, Diego; CASTRILLÓN VALDÉS, Matilde. Procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la Guadua. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia: 2004. 94 p.
- [10] MARTÍN B., José Virgilio; MATEUS T., Lelio Rafael. Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua castilla. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia: 1981.
- [11] MORENO M. Luis E., OSORIO S. Lina R., TRUJILLO DE LOS RÍOS Efraín E. Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *Guadua angustifolia*. Ingeniería & Desarrollo. Colombia: 2006.
- [12] OSORIO, Jairo Alexander; VÉLEZ, Juan Manuel; CIRO, Héctor José. Estructura interna de la guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín: 2006.
- [13] PACHECO PUENTES, Cari Alejandra. Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra de la *Guadua angustifolia*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: 2006.
- [14] PANTOJA TRUJILLO, Nelson; ACUÑA JIMÉNEZ, Diego. Resistencia al corte paralelo a la fibra de la *Guadua angustifolia*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia: 2005. 94 p.
- [15] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL DE COLOMBIA / INFORME FINAL. Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: 2010. 190p.

Anexo 1

Comparativo de los valores determinados para la *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima frente a los del Proyecto MADRC y la NSR-10.

Tabla anexo 1.1: Comparativo de los valores determinados para los esfuerzos admisibles

TIPO DE ENSAYO	NÚMERO ENSAYOS	VALOR ESFUERZO ADMISIBLE (MPa)	CONTENIDO HUMEDAD (CH%)	DEPARTAMENTO LUGAR DE ORIGEN	FUENTE
CORTE PARALELO A LA FIBRA (V)	64	0.73	100.60	TOLIMA	ARDILA (2013)
	91	0.91	84.20	QUINDIO	Proyecto MADRC* (2010)
	75	1.14	117.24	CUNDINAMARCA	
	80	1.37	99.00	VALLE DEL CAUCA	
	> 20	1.20	12.00	N/A	NSR-10 (2010)
COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA (C)	35	6.29	95.27	TOLIMA	ARDILA (2013)
	28**	17.61	12.65		
	76	10.84	65.33	QUINDIO	Proyecto MADRC* (2010)
	70	11.43	102.66	CUNDINAMARCA	
	74	12.10	99.44	VALLE DEL CAUCA	
	> 20	14.00	12.00	N/A	NSR-10 (2010)
TRACCIÓN PARALELA A LA FIBRA (T)	36	5.09	51.87	TOLIMA	ARDILA (2013)
	22**	5.31	14.13		
	61	5.99	85.97	QUINDIO	Proyecto MADRC* (2010)
	49	6.41	95.75	CUNDINAMARCA	
	51	6.90	96.14	VALLE DEL CAUCA	
	> 20	18.00	12.00	N/A	NSR-10 (2010)
FLEXIÓN (F)	12	10.19	19.91	TOLIMA	ARDILA (2013)
	61	13.64	73.25	QUINDIO	Proyecto MADRC* (2010)
	12	8.66	72.27	CUNDINAMARCA	
	11	7.40	55.60	VALLE DEL CAUCA	
	> 20	15.00	12.00	N/A	NSR-10 (2010)
COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA (Cp)	69	1.07	83.60	TOLIMA	ARDILA (2013)
	47	1.38	78.58	QUINDIO	Proyecto MADRC* (2010)
	50	0.61	73.84	CUNDINAMARCA	
	53	0.60	93.86	VALLE DEL CAUCA	
	> 20	1.40	12.00	N/A	NSR-10 (2010)

*Los valores señalados del Proyecto MADRC (2010) fueron modificados de su ecuación original, la 4.3, y recalculados con la ecuación 4.2, con el fin de poder comparar todos los resultados apropiadamente. **Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

La Figura anexo 1.1 presenta un cuadro comparativo de los valores determinados para los esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth según varios departamentos de Colombia y los de la NSR-10.

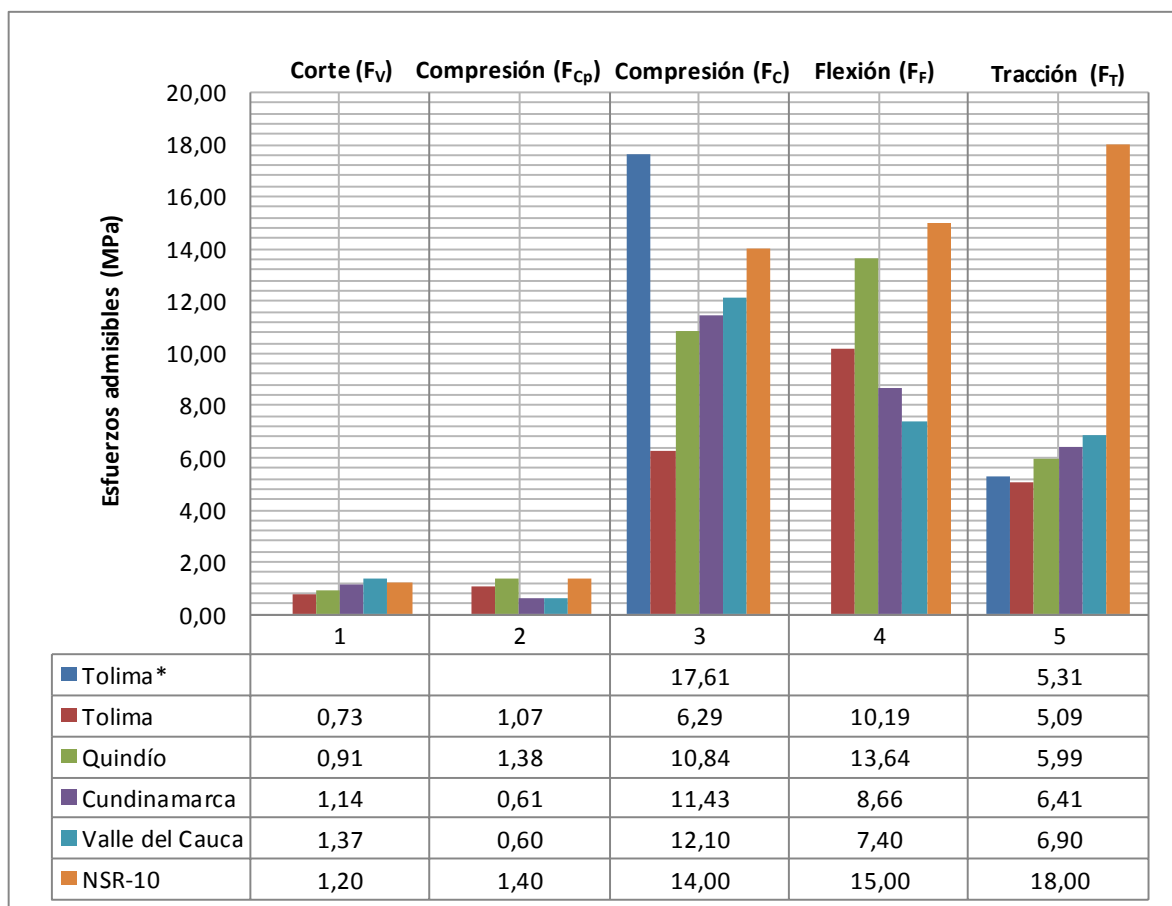


Figura anexo 1.1: Comparativo de los valores determinados para los esfuerzos admisibles de diferentes departamentos de Colombia y los de la NSR-10. *Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

De acuerdo con el esquema de barras de la Figura anexo 1.1 se debe revisar la normativa, ya que la NSR-10 considera como la principal fortaleza de la *Guadua angustifolia* Kunth la resistencia al esfuerzo a tracción paralela a la fibra, por encima casi 1,3 veces del esfuerzo a compresión paralela. Y en este trabajo se considera de manera general como la principal fortaleza de la *Guadua angustifolia* Kunth (y en el Proyecto MADRC) la resistencia al esfuerzo a compresión paralela a la fibra, por encima más de 3.3 veces del esfuerzo a tracción paralela a la fibra. Es decir, no sólo cambia la jerarquía e importancia del comportamiento de este material en cuanto a sus esfuerzos admisibles, sino que muestra una enorme diferencia entre uno y otro esfuerzo.

La Tabla anexo 1.2 contiene un cuadro comparativo de los valores determinados para el módulo de elasticidad longitudinal del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima frente a los del Proyecto MADRC, de acuerdo con el ensayo respectivo y su contenido de humedad.

Tabla anexo 1.2: Comparativo de los valores determinados para el módulo de elasticidad longitudinal del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima frente a los del Proyecto MADRC, y la NSR-10. *Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

TIPO DE ENSAYO	NÚMERO ENSAYOS	MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL (MPa)			CONTENIDO HUMEDAD (CH%)	DEPARTAMENTO LUGAR DE ORIGEN	FUENTE
		PROMEDIO	PERCENTIL 5	MÍNIMO			
COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA (C)	28	17649	11593	11469	12.65	TOLIMA*	ARDILA (2013)
	58	10169	2806	1910	62.62	QUINDIO	Proyecto MADRC (2010)
	35	8008	2036	1261	100.32	C/MARCA	
	42	8117	1837	1080	97.35	V/ CAUCA	
TRACCIÓN PARALELA A LA FIBRA (T)	22	15324	10668	9938	13.87	TOLIMA*	ARDILA (2013)
	69	7534	4075	2842	85.45	QUINDIO	Proyecto MADRC (2010)
	71	5668	2827	2009	96.09	C/MARCA	
	71	6451	2976	2489	96.17	V/ CAUCA	
FLEXIÓN (F)	12	14933	11585	11439	19.91	TOLIMA	ARDILA (2013)
	62	13564	8390	7452	73.25	QUINDIO	Proyecto MADRC (2010)
	12	14511	10797	10539	72.27	C/MARCA	
	12	15052	4754	2996	55.60	V/ CAUCA	
	> 20	9500	7500	4000	12.00	N/A	NSR-10 (2010)

En la Figura anexo 1.2 se comparan los valores determinados del módulo de elasticidad longitudinal para el ensayo a compresión paralela según su departamento de origen, es decir los del presente proyecto con los del Proyecto MADRC. Allí se determina que el bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima para el ensayo de compresión paralela (F_c) posee un valor promedio de módulo de elasticidad longitudinal de 17649 MPa, un valor del percentil 5 de 11593 MPa, y un valor mínimo de 11469 MPa, siendo los mayores valores en todos los casos, en comparación con los valores encontrados en el Proyecto MADRC.

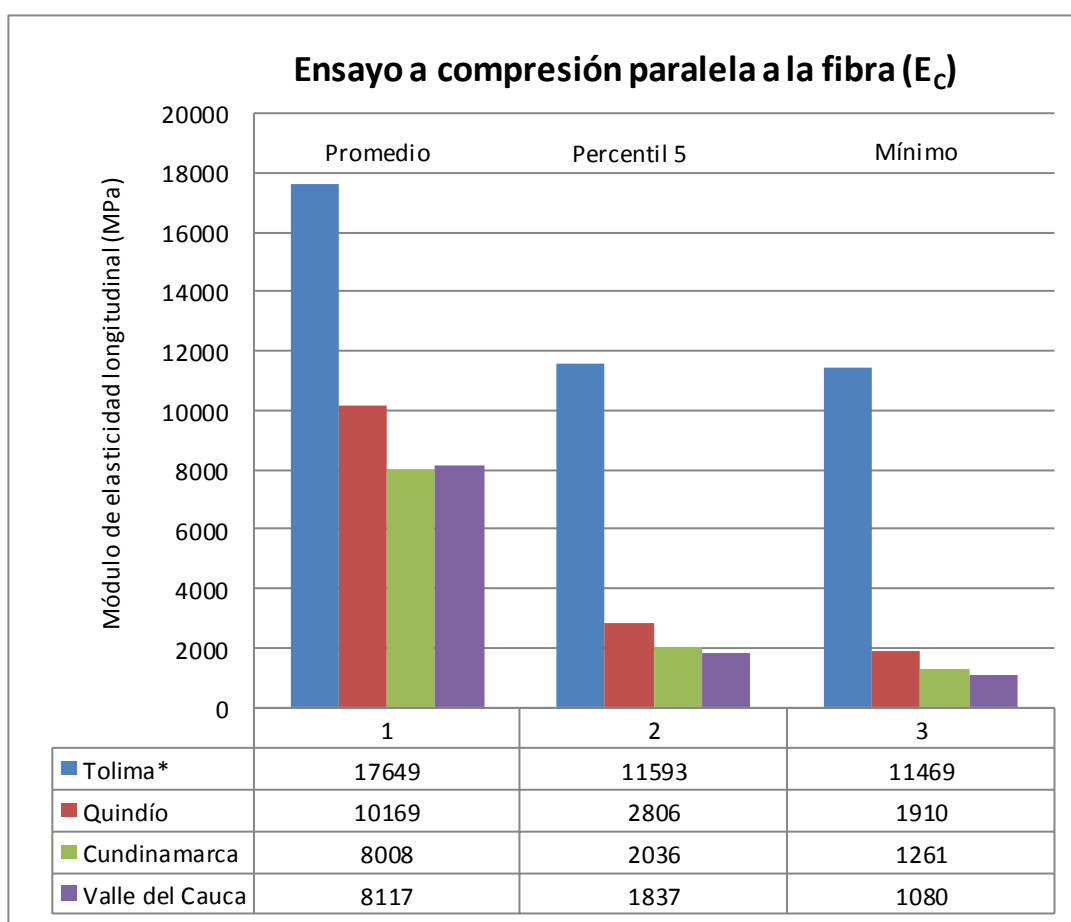


Figura anexo 1.2: comparativo de los valores determinados del módulo de elasticidad longitudinal para el ensayo a compresión paralela a la fibra según su origen. *Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

En la Figura anexo 1.3 se comparan los valores determinados del módulo de elasticidad longitudinal para el ensayo a tracción paralela según su departamento de origen. Allí se determina que el bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima para el ensayo de tracción paralela (F_T) posee un valor promedio de módulo de elasticidad longitudinal de 15324 MPa, un valor del percentil 5 de 10668 MPa, y un valor mínimo de 9938 MPa, siendo los mayores valores en todos los casos, en comparación con los valores encontrados en el Proyecto MADRC.

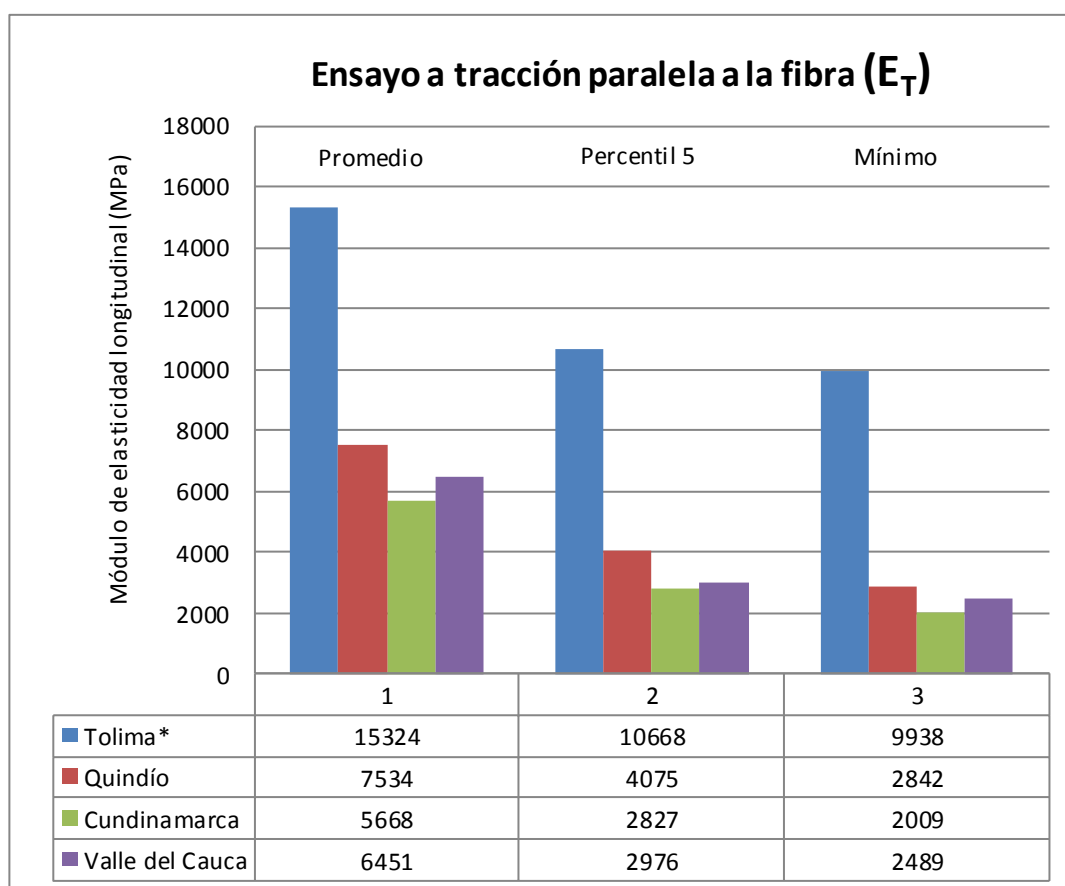


Figura anexo 1.3: Comparativo del módulo de elasticidad ensayo a tracción paralela según origen. *Probetas instrumentadas con deformímetro eléctrico.

En la Figura anexo 1.4 se comparan los valores determinados del módulo de elasticidad longitudinal para el ensayo a flexión según su departamento de origen. Allí se determina que el bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima para el ensayo de flexión (F_T) posee un valor promedio de módulo de elasticidad longitudinal de 14933 MPa, un valor del percentil 5 de 11585 MPa, y un valor mínimo de 11439 MPa, siendo los mayores valores en todos los casos, en comparación con el valor encontrado en la NSR-10, y con los valores determinados para los del Proyecto MADRC, excepto con el valor promedio del departamento del Valle del Cauca que es de 15052 MPa, comparado con del Tolima que es 14933 MPa.

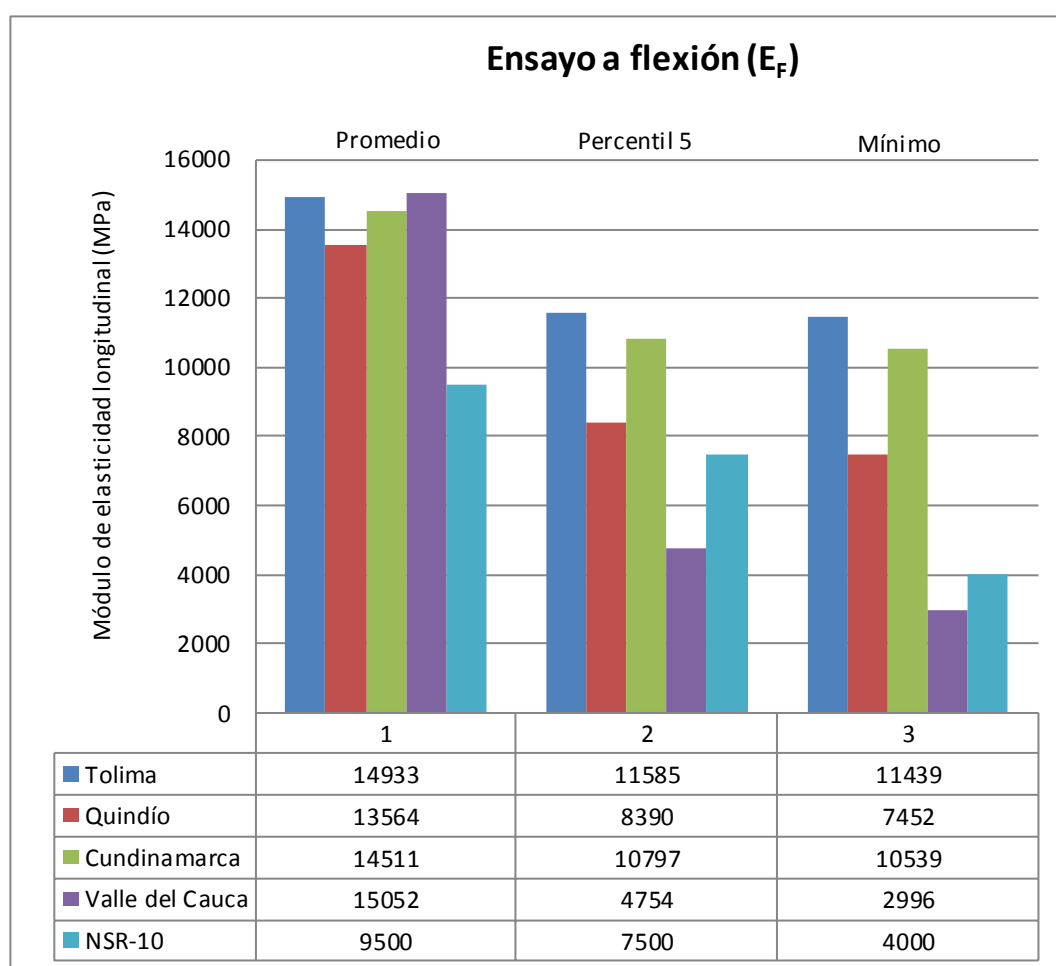


Figura anexo 1.4: comparativo módulo de elasticidad longitudinal ensayo a flexión según origen.

La Tabla anexo 1.4 contiene un cuadro comparativo de los valores determinados para el coeficiente de Poisson del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima frente a los del Proyecto MADRC, de acuerdo con el ensayo respectivo y el número de probetas.

Tabla anexo 1.3: Comparativo de los valores determinados para el coeficiente de Poisson del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima frente a los del Proyecto MADRC.

No.	TIPO DE ENSAYO	NÚMERO DE ENSAYOS	COEFICIENTE DE POISSON (MPa)	DEPARTAMENTO LUGAR DE ORIGEN	FUENTE
1	COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA (C)	6	0.43	TOLIMA	ARDILA (2013)
		22	0.35	QUINDIO	Proyecto MADRC (2010)
				CUNDINAMARCA	
				V/ DEL CAUCA	